

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

Desenvolvimento de Requisitos de Desempenho para Elastômeros de Isoladores da Rede de Energia Elétrica

Autor: FÁBIO NORONHA

Orientadora: Profa. Dra. LUCIA HELENA INNOCENTINI MEI

Co-orientadora: Dra. JOCELI MARIA GIACOMINI ANGELINI

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Campinas – São Paulo

Fevereiro de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

N789d Noronha, Fábio
Desenvolvimento de requisitos de desempenho para
elastômeros de isoladores da rede de energia elétrica /
Fábio Noronha. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientadores: Lucia Helena Innocentini Mei, Joceli
Maria Giacomini Angelini.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. EPDM. 2. Compósitos poliméricos -
Deteriorização. 3. Envelhecimento - Aspectos
moleculares. 4. Silicone. 5. Polímeros - Propriedades
elétricas. I. Mei, Lucia Helena Innocentini. II. Angelini,
Joceli Maria Giacomini. III. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV.
Título.

Título em Inglês: Development of performance requirements for elastomers
insulators of electricity network

Palavras-chave em Inglês: EPDM, Polymeric composites - Deterioration,
Aging - Molecular aspects, Silicone, Polymers -
Electrical properties

Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Leila Peres, Bernardo José Guilherme de Aragão

Data da defesa: 22/02/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

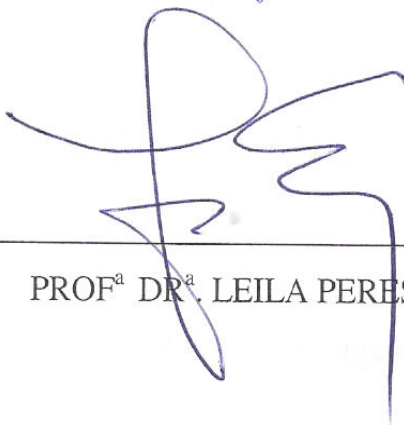
Dissertação de Mestrado defendida por Fábio Noronha e aprovada em 22 de Fevereiro de 2010 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



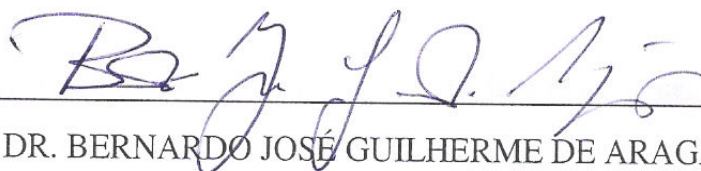
Prof^a. Dr^a. - LUCIA HELENA INNOCENTINI MEI



Dr^a. JOELI MARIA GIACOMINI ANGELINI



PROF^a DR^a. LEILA PERES



DR. BERNARDO JOSÉ GUILHERME DE ARAGÃO

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida por Fábio Noronha e aprovada pela comissão julgadora em 22 de fevereiro de 2010.



Profª. Drª. LÚCIA HELENA INNOCENTINI MEI

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi fruto do esforço e dedicação de várias pessoas, que contribuíram das mais variadas formas para a realização do mesmo. Esperando não esquecer de ninguém, agradeço sinceramente,

À Prof. Dra. Lúcia H I. Mei, pela orientação, idéias, incentivo e cobrança, fundamentais para a conclusão do trabalho;

À Dr^a. Joceli Maria Giacomini Angelini, pela orientação, amizade, incentivo e empenho pessoal para realização desta dissertação;

À Dra Leila Peres e Dr. João Sinézio de Carvalho Campos pelas valiosas contribuições ao trabalho;

À Fundação CPqD, pela oportunidade que me foi dada e pelo fornecimento de toda infraestrutura laboratorial necessária para execução do trabalho;

Aos colegas e ex-colegas de trabalho, ao Alexandre, pelo apoio; ao Andrade pelo incentivo e companheirismo; ao Volponi, pela colaboração e amizade; e às pessoas e amigos que não mencionei mas que, de uma forma ou de outra, também contribuíram para a realização deste trabalho;

À SEDIVER, França, Electrovidro (RJ) e COELBA, Nilton Goes, Mário, Anísio e Brito, pelo fornecimento dos insumos necessários para a realização do trabalho.

Ao corpo Docente do Departamento de Tecnologia de Polímeros da Faculdade de Engenharia da UNICAMP pela minha formação.

Agradecimentos ao apoio financeiro da ANEEL.

RESUMO

Atualmente, os materiais utilizados como isoladores elétricos vêm sendo substituídos por materiais poliméricos por apresentarem vantagens em relação aos isoladores cerâmicos. Dentre estas vantagens, podem-se citar maior desempenho, melhor resistência ao vandalismo e menor peso.

O objetivo desta dissertação foi o estabelecimento de desenvolver requisitos de desempenho para os Isoladores Poliméricos (EPDM- Monomero Dieno/Etileno/Propileno e Silicone) usados na rede elétrica, através de resultados obtidos em ensaios de envelhecimento natural e artificial, tendo como enfoque as linhas de transmissão de 69 kV e 138 kV.

Foi realizado um estudo do estado da arte em Isoladores Poliméricos e do estado atual de aplicação e desempenho dos mesmos em campo. Estudos experimentais foram desenvolvidos em produtos retirados de campo e produtos novos, envelhecidos artificialmente em laboratório, segundo metodologias aplicáveis a polímeros. Em paralelo foram estudadas mantas elastoméricas de Silicone e EPDM para elaboração de critérios comparativos. Através dos resultados obtidos, foram sugeridos alguns requisitos de desempenho que poderão ser utilizados em especificações dos mesmos. Nesta dissertação, são apresentados, principalmente, estes resultados obtidos por meio das técnicas de ensaio de Tensões Elétricas, Rugosidade, Densidade, Dureza, FTIR-Infravermelho com Transformada de Fourier, DSC-Calorimetria Exploratória, DMTA-Análise Térmica Dinâmico Mecânica e Resistência à Tração. Os resultados obtidos mostraram a importância de controle da rugosidade bem como da necessidade de aditivação do polímero com sistema de termo e foto estabilização.

Palavras-chave: *EPDM, Silicone, Degradação de Materiais Poliméricos; Envelhecimento Natural; Envelhecimento Acelerado; Isoladores Poliméricos.*

ABSTRACT

Currently, the materials used as electrical insulators are being replaced by polymeric materials have advantages as compared to ceramic insulators. Among these advantages, we can cite higher performance, better resistance to vandalism and lower weight.

The objective of this thesis was the establishment of developing performance requirements for Polymeric Insulators (EPDM monomer diene / ethylene / propylene and Silicone) used in power systems, through results from trials of natural and artificial aging, focusing on the lines transmission of 69 kV and 138 kV.

We conducted a study of the state of the art in Polymeric Insulators and current state of implementation and performance of the same field. Experimental studies have been developed into products removed from the field and new, artificially aged in the laboratory, according to the methods applied to polymers. Were studied in parallel webs of silicone elastomer and EPDM for developing benchmarks. Through the results, suggested some performance requirements that could be used in the same specifications. In this thesis, are presented, mainly, these results obtained by the techniques of test voltages, roughness, density, hardness, FTIR-Fourier Transform Infrared, Scanning Calorimetry-DSC, DMTA Dynamic-Mechanical Thermal Analysis and Tensile Strength . The results showed the importance of controlling the roughness and the need for additives with the polymer system and picture stabilization term.

Key words: *EPDM, Silicone, Polymer degradation; Natural aging; Accelerated aging; Polymeric insulators; Performance requirements*

**ARTIGOS APRESENTADOS EM CONGRESSOS E PUBLICAÇÕES GERADAS
POR ESTA DISSERTAÇÃO**

- Noronha, F.; Angelini, J. M. G.; Góis N. C. ; L. H. I. Mei. – “Performance Development Requirements for Elastomers of Electric Power Network Insulators”, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 162-163: 102-108 (2005).
- Noronha, F.; Angelini, J. M. G.; Góis N. C. ; L. H. I. Mei. – 8th International Scientific Conference on Advances in Materials and Processing Technologies – **13th International Scientific Conference on Achievements in Mechanical and Materials Engineering - May 2005 COMMENT'2005** Congress Secretariat Faculty of Mechanical Engineering, Silesian University of Technology ul. Konarskiego 18^a Poland
- Noronha, F.; Angelini, J. M. G.; Góis N. C.; L. H. I. Mei. – Performance Development Requirements For Elastomers of Electric Power Network Insulators VI CLAGTEE - **6º Congreso Latinoamericano Generación y Transporte de la Energía Eléctrica, 2006** - Mar Del Plata

Sumário

NOMENCLATURA E ABREVIACÕES	X
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 – HISTÓRICO.....	12
2.2 – ISOLADORES POLIMÉRICOS	14
2.3 – DESEMPENHO DOS ISOLADORES	16
2.3.1 – <i>Desempenho e Natureza do Material Isolador</i>	16
2.3.2 – <i>Desempenho e características da rede</i>	18
2.3.3 – <i>Desempenho e Aspectos Ambientais</i>	19
2.4 – FENÔMENOS DE “FLASHOVER” E CORRENTE DE FUGA	20
2.5 – MECANISMOS RESPONSÁVEIS PELA PERDA DE HIDROFOBICIDADE DO ISOLADOR.....	22
2.6 – <i>Avaliação dos Isoladores em Campo – Inspeções</i>	24
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 - MATERIAIS E MÉTODOS (PARTE I)	26
3.2 - MATERIAIS E MÉTODOS (PARTE II)	27
3.2.1 - <i>Materiais</i>	27
3.2.2 – <i>Métodos</i>	27
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 TIPOS DE DEFEITOS ENCONTRADOS EM LEVANTAMENTO REALIZADO PARA ISOLADORES POLIMÉRICOS EM CAMPO.....	31
4.2 ENVELHECIMENTO TÉRMICO	36
4.3 ENVELHECIMENTO EM NÉVOA SALINA E EM ÁGUA.....	36
4.4 ENVELHECIMENTO EM INTemperismo ARTIFICIAL (QUV).....	37
4.5 - ENSAIOS DE RESISTIVIDADE SUPERFICIAL E VOLUMÉTRICA PARA MANTAS ELASTOMÉRICAS E ISOLADORES	38
4.6 - ENSAIOS DE RUGOSIDADE	43
4.7 – ENSAIOS DE DUREZA	47
4.8 - ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	48
4.9 - ENSAIOS POR TGA NOS ISOLADORES	52
4.10- CALORIMETRIA DIFERENCIAL EXPLORATÓRIA DE VARREDURA (DSC) NOS ISOLADORES E MANTAS..	53
4.11- ANÁLISE TERMO-DINÂMICO-MECÂNICA (DMTA) PARA ISOLADORES DE EPDM	55
4.12 - ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO (FTIR)	58
4.13- MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) COM MICRO-ANÁLISE (MA) POR RAIOS- X	60
4.14- ENSAIOS ELÉTRICOS	65
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E REQUISITOS DE DESEMPENHO	66
ANEXO A.....	69
ANEXO B.....	72
ANEXO C.....	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

Nomenclatura e Abreviações

Símbolo	Abreviações
AFM	Microscopia de força atômica (<i>atomic force microscopy</i>)
EPDM	Elastômero de copolímero de etileno, propileno e dieno não-conjugado (<i>ethylene propylene diene methylene elastomer</i>)
EPR	Borracha de etileno propileno ou de etileno propileno dieno (<i>ethylene propylene rubber</i>)
CE	Epóxi cicloalifático (<i>cycloaliphatic epoxis</i>)
SIR	Borracha de silicone (<i>silicone rubber</i>)
PTFE	Poli (tetrafluoretileno) (Teflon [®])
IP'S	Isoladores poliméricos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
QUV	Envelhecimento à luz UV com lâmpadas fluorescentes
DSC	Calorimetria diferencial de varredura
FTIR	Infravermelho com transformada de Fourier (Infra-Red Transformation Fourier)
DC	Corrente contínua
AC	Corrente alternada
Flashover	Passagem de corrente pelo isolador, formando um arco voltáico.

Capítulo 1 - Introdução

Um constante anseio de usuários de produtos poliméricos diz respeito ao aspecto da vida útil do material para a aplicação específica. É bem conhecido o efeito da degradação de um elastômero em um isolador de redes de tensão que pode acarretar uma falha ou parada na rede de transmissão ou distribuição de energia elétrica. Para se viabilizar a melhoria contínua dos materiais e dos processos para obtê-los, a certificação de produtos e a homologação de fornecedores se fazem necessários. Portanto, é altamente recomendado que se definam as características funcionais e de desempenho mais adequadas às propriedades finais requeridas do material. Neste sentido, além dos requisitos funcionais já exigidos por normas, esse trabalho teve como objetivo desenvolver requisitos de desempenho para os Isoladores Poliméricos (EPDM e Silicone) da rede elétrica da Bahia, por meio de resultados de ensaios obtidos e correlacionados com envelhecimentos naturais e artificiais, tendo como enfoque as linhas de transmissão de 69 kV da COELBA. Para tanto, analisaram-se as variações de propriedades de superfície ou de massa desses materiais, após os envelhecimentos. Entre tais propriedades, incluem-se as propriedades físicas, químicas, elétricas e mecânicas, estudadas neste projeto.

Mais especificamente, o presente trabalho apresenta as investigações preliminares no levantamento das condições operacionais e de desempenho, em campo, de isoladores poliméricos utilizados em linhas de 69kV.

As informações foram coletadas em duas etapas. Na primeira, foi feito um levantamento do histórico da utilização de isoladores poliméricos, das causas que levaram à sua introdução em determinadas empresas, do percentual de aplicação, das classes de tensão, dos modelos e fabricantes mais utilizados, do índice de defeitos e defeitos mais freqüentes e das possíveis causas de ocorrência de falhas nos isoladores. Numa segunda etapa foi feito o acompanhamento das inspeções dos isoladores em campo através dos ensaios elétricos, físicos e químicos em laboratório. Ensaio de envelhecimento acelerado em formulações propostas e em produtos comerciais novos, também foram realizados.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1 – Histórico

Dentro de uma visão histórica, os isoladores poliméricos (IP's) têm sua primeira versão nos anos 40 do século XX quando materiais isolantes orgânicos foram utilizados para fabricar isoladores elétricos de alta tensão, para uso em ambientes internos, a partir de resinas epóxi ¹.

As primeiras gerações de isoladores poliméricos comercialmente disponíveis para uso em linhas de transmissão de energia elétrica, datam de 1975, sendo os primeiros modelos comercialmente disponíveis, listados na Tabela 2.1².

Tabela 2.1 - Primeiros modelos de isoladores poliméricos comercialmente disponíveis e seus fabricantes

Fabricante	Material	Ano	País
Ceraver	EPR	1975	França
Ohio Brass	EPR	1976	EUA
Rosenthal	SIR	1976	Alemanha
Sediver	EPR	1977	França
TDL	CE	1977	Inglaterra
Lapp	EPR	1980	EUA
Reliable	SIR	1983	EUA

O uso desses isoladores ocorreu somente nos anos 80, e os materiais utilizados eram principalmente baseados em resinas cicloalifáticas, borracha de etileno-propileno CE (epóxi cicloalifáticas), EPR (borracha de etileno-propileno) e SIR (borracha de silicone).

O uso de IP's trouxe uma nova opção para minimizar a manutenção das linhas de transmissão, principalmente para áreas poluídas (corrosão dos materiais) e sob vandalismo (tiros e pedradas). Outras vantagens são a compactação de linhas em áreas urbanas devido a grande quantidade de instalações de cabos de outras concessionárias e a recapacitação de instalações existentes ³.

Em 1993 os isoladores poliméricos representavam 20 % do mercado americano de isoladores para Linhas de Transmissão e, pelo fato de ser uma tecnologia ainda nova, sua expectativa de vida ainda era pouco conhecida, contrastando com o conhecimento a respeito de isoladores de vidro e porcelana que já possuíam de forma determinada a referida expectativa de vida¹.

O uso de isoladores poliméricos para alta tensão tem sido bem aceito em todo o mundo. Esses materiais representavam até 1999 cerca de 60% a 70% dos dispositivos instalados na América do Norte. Segundo Hackam^{4,5}, o grande crescimento na aplicação é devido às vantagens (vandalismo, e custo-benefício) em relação aos isoladores de vidro ou cerâmico.

Atualmente, as tecnologias predominantes nesta área são baseadas em compostos de EPDM e de Silicone, cujo uso em linhas de transmissão e distribuição estão bem difundido.

No Brasil, a Companhia de Eletricidade da Bahia (COELBA) foi uma das pioneiras na utilização de isoladores poliméricos, tendo sido instaladas as primeiras peças em 1989. Essa companhia possui 8.100 km de linhas de sub-transmissão (69 e 138 kV) e estão instalados hoje, aproximadamente, 40.000 cadeias de isoladores poliméricos. Por ano, são instaladas, aproximadamente, 5.000 novas peças poliméricas em substituição aos isoladores convencionais de vidro e de porcelana, principalmente em regiões com ocorrência de vandalismo, sendo que existe o projeto de priorizar o uso de isoladores poliméricos nessas regiões.

O tipo de isolador mais utilizado atualmente é o de bastão, baseado em um compósito de fibra de vidro com resina, revestido de cobertura e aletas de EPDM, para 69 kV ou 138 kV. Esses isoladores são fabricados no Brasil, por exemplo, pela Electrovidro, utilizando tecnologia Sediver – grupo Electrovidro.

Para as classes acima de 138 kV, são utilizados somente isoladores compostos de silicone, devido ao seu desempenho ser considerado superior ao do EPDM. Lembre-se aqui que estas classes exigem um maior grau de atenção e segurança devido à alta voltagem formando o “flashover”.

Atualmente, as concessionárias de energia estão adquirindo e especificando isoladores poliméricos devido ao seu melhor custo benefício. Em relação a custos um

isolador polimérico e uma cadeia convencional (vidro ou porcelana) são equivalentes nos dias de hoje.

Em virtude do pouco tempo de utilização, a questão mais proeminente, com relação à utilização de isoladores poliméricos em linhas de Alta Tensão, diz respeito à previsão de sua vida útil em campo através da avaliação do modo de falha e detecção da corrente de fuga, entre outras. Nesse sentido, o levantamento das condições de desempenho em ambiente operacional fornece informações importantes subsídios para uma avaliação da previsão de vida útil dos IP's, sendo um procedimento indispensável.

2.2 – Isoladores Poliméricos

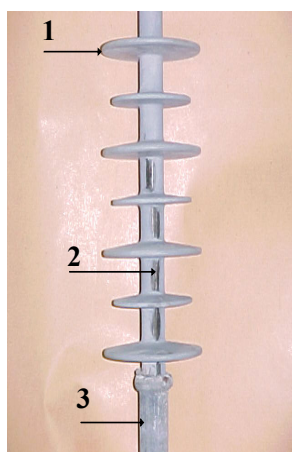


Figura 2.1 – Isolador elétrico polimérico

Basicamente os isoladores elétricos poliméricos, como modelos mostrados na figura 2.1, são constituídos de três partes: (1) resina de revestimento que recobre o núcleo e forma as aletas, (2) compósito de fibra de vidro e (3) ferragens de conexão. Os materiais que constituem o revestimento podem ser borracha de EPDM, borracha de silicone e blendas de borrachas com silicone^{2, 3}. Abaixo são citadas algumas características referentes a esses materiais:

- Borracha de EPDM – apresenta baixo custo, bom desempenho elétrico (razoável resistência ao trilhamento e à erosão), boa resistência mecânica e hidrofobicidade baixa.

- Borracha de silicone (elastômeros com silicone em percentuais de 18% a 35%) – apresenta alto custo, bom desempenho elétrico, baixa resistência mecânica e hidrofobicidade alta, o que faz com que sejam usadas em regiões desérticas, diminuindo o acúmulo de poluentes na superfície do isolador.
- Blendas de borrachas (compostos de borracha, de EPDM na maioria, com percentuais de 4% a 8% de silicone) – custo razoável, bom desempenho elétrico, boas resistência mecânica e hidrofobicidade.

Como material de reforço, os isoladores poliméricos apresentam cargas inorgânicas, como a alumina, que têm a finalidade de obter apropriadas características elétricas e mecânicas.

No entanto, como os IP's são relativamente novos, sua expectativa de vida e o seu desempenho ao longo do uso ainda não são totalmente conhecidos. Esses isoladores podem sofrer erosão e trilhamento na presença de contaminantes, o que leva ao desenvolvimento de bandas de arco e, sob certas circunstâncias, até à falha desse isolador. Outro ponto importante está relacionado com a maior susceptibilidade às mudanças nas propriedades de superfície do isolador, devido ao seu envelhecimento ambiental. Sabe-se, atualmente, que a deterioração causada pelo envelhecimento é a principal causa das falhas nos isoladores poliméricos, representando 64% das mesmas. Já os problemas mecânicos e elétricos representam 35% e o vandalismo 1%.

Alguns isoladores operam por muitos anos, enquanto outros falham em poucos meses. Tal variação no desempenho causa restrições de uso quanto ao envelhecimento e expectativa de vida desses dispositivos. Além desses fatores, de acordo com Gela e colaboradores ⁶, há dificuldade de detecção de defeitos e falta de garantia da integridade funcional em campo, desses isoladores.

Técnicas laboratoriais capazes de produzir os efeitos dos agentes naturais causadores do envelhecimento têm sido desenvolvidas. Por meio delas, pode-se avaliar o comportamento dos IP's quando submetidos às solicitações de operação e do ambiente ⁷.

2.3 – Desempenho dos Isoladores

O desempenho dos isoladores em campo mostra-se dependente da combinação de vários fatores; dentre os quais, podem-se incluir os aspectos ambientais, o tipo de material que constitui o isolador e as condições de operação da rede elétrica. Esses fatores, de acordo com a natureza, podem ser classificados em elétricos, mecânicos, químicos e térmicos. A radiação ultravioleta e a absorção de água também contribuem para o envelhecimento dos materiais expostos às intempéries. Os efeitos de tais fatores são manifestados como danos internos ou externos, com perdas de propriedades elétricas, mecânicas e físico-químicas ⁸. Segue uma breve discussão do desempenho dos isoladores e das condições que exercem influência sobre os mesmos.

2.3.1 – Desempenho e Natureza do Material Isolador

A influência do material do isolador no seu desempenho, foi estudada por Gonzalez e colaboradores ⁹, que analisaram as propriedades dielétricas de composições de silicone em função da incorporação de quantidades variadas de alumina triidratada e sílica. Com a incorporação desse tipo de carga, é possível diminuir o aparecimento de correntes de fuga e arcos de bandas secas; melhorar a estabilidade térmica dos isoladores, além da carga atuar como retardante de chama e suprimir a fumaça em materiais poliméricos. Para estudar as dosagens que melhor se aplicam às composições, os pesquisadores prepararam isoladores com diferentes cargas de alumina e sílica e testaram suas propriedades dielétricas, antes e após o envelhecimento acelerado, por aproximadamente três meses. Os ensaios de resistência ao trilhamento mostraram que os compósitos com carga de 1:1:0,2 e 1:1,5:0 de polímero, alumina e sílica, respectivamente, apresentaram a mais alta resistência ao trilhamento. As composições possuindo carga de alumina menor que 50% não apresentaram nenhum aumento na resistência ao trilhamento, sugerindo que esse valor está abaixo do valor crítico. Após o envelhecimento acelerado, os isoladores mostraram comportamento diverso dependendo da composição. O polímero de Silicone não teve alteração negativa e a sua resistividade apresentou aumento. A adição da alumina mostrou-se adequada na melhoria da resistência ao trilhamento elétrico do material, embora prejudicasse algumas das propriedades dielétricas (resistividade e rigidez)

Vlastos e colaboradores¹⁰ estudaram a influência do material e da tensão elétrica no desempenho dos isoladores poliméricos. O comportamento e estabilidade sob condições de poluição salina foram estudados para EPDM e silicone. Os resultados mostraram que um bom desempenho pode ser conseguido em ambiente poluído, quando o material do isolador é bem escolhido e formulado.

Um outro estudo foi realizado por Garcia e colaboradores⁷, no qual os autores avaliaram o processo de envelhecimento de isoladores poliméricos tipos suspensão e *line post*, com revestimento em EPDM e borracha de silicone, para sistemas de 138 kV, através de envelhecimento acelerado. Eles observaram que isoladores de borracha de silicone, por serem mais hidrofóbicos, apresentaram melhores condições superficiais que os de EPDM, a partir da avaliação da corrente de fuga. Após o recobrimento de isoladores de vidro utilizando borracha de silicone, estes apresentaram nível de desempenho elétrico equivalente aos isoladores poliméricos, sendo constatada também, a influência do perfil do isolador. As análises dos isoladores danificados, simulando uma ação de vandalismo, apresentaram desempenho elétrico satisfatório quando comparados aos seus equivalentes perfeitos, contudo o aumento do nível de poluição mostrou uma queda significativa neste aspecto. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram um bom desempenho dos IP's. Por outro lado, os ensaios de material revelaram uma considerável influência do efeito provocado pelo envelhecimento acelerado na característica de resistividade superficial dos materiais testados, tornando-os susceptíveis a correntes de fuga mais elevadas.

Isoladores poliméricos tipo *line post* de 138 kV, fabricados com aletas de elastômeros de EPDM e Silicone também foram estudados por Fukuda e colaboradores¹¹. Nesse estudo, os isoladores ficaram permanentemente carregados com o valor máximo da carga mecânica nominal, e submetidos à tensão elétrica de trabalho (80 kV, fase-terra) durante um período de 5 anos ininterruptos em ambiente externo natural. Esses testes tiveram por objetivo a obtenção de subsídios para a aplicação futura em linhas de transmissão urbanas, bem como avaliar o desempenho global de IP's nessas condições. Ensaios de materiais indicaram que as aletas dos isoladores encontraram-se em condições satisfatórias após 5 anos de instalação. Os valores de deflexão tenderam a uma estabilização ao longo dos cinco anos de observação. Foi observado que em uma unidade ocorreu ruptura logo após a instalação do isolador, sendo a mesma causada pela penetração de umidade no

bastão de fibra de vidro. Isso indicou que as vedações nos terminais são de fundamental importância para o desempenho do isolador em serviço.

2.3.2 – Desempenho e características da rede

Conforme anteriormente mencionado, as características da rede também afetam o desempenho do isolador. Para estudar estes efeitos, muitos polímeros sob tensão por AC e DC foram experimentalmente estudados³⁰. O desempenho pode ser avaliado pelo acompanhamento em função de acúmulos e decaimentos de cargas em função da umidade bem como suas resistências à erosão e ao trilhamento. Os resultados obtidos indicam que há alterações significativas nos fenômenos de superfícies entre AC e DC. O processo de polarização por corrente DC leva à perda de hidrofobicidade, o que influencia o desempenho de materiais sujeitos à poluição e tensões elétricas por DC. Estudos conduzidos por Moreno e Gorur¹² constatarem uma redução na resistência ao trilhamento e à erosão dos materiais poliméricos com tensão por DC, em comparação com AC. O pior desempenho foi atribuído aos maiores valores e tempos de descarga de corrente DC.

Dada a complexidade dos fenômenos e mecanismos que envolvem o desempenho dos isoladores e, com o objetivo de estudar esses fenômenos de forma mais sistemática, muitos autores utilizam metodologias específicas. Dentre estes, pode-se citar Montesinos e colaboradores¹³ que descreveram uma metodologia estatística para construir modelos para a comparação de desempenho de materiais que são aprovados nos ensaios de erosão e trilhamento. Kishky e colaboradores¹⁴ também investigaram campos elétricos das superfícies de isoladores usando métodos computacionais. O método é baseado na técnica de simulação de carga; a intensificação do campo elétrico produzida pelas gotículas de água é calculada e correlacionada com a atividade da descarga elétrica que ocorre em isoladores, sob situação de contaminação, o que pode ser usado para analisar o desempenho destes isoladores em condições de contaminação.

Um outro método bastante divulgado, conhecido como Método da Rampa, é descrito e é mostrada sua habilidade para detectar e monitorar isoladores delaminados, com suporte em dados de campo, conforme estudo feito por Rux e Grzybowski¹⁵ que realizaram ensaios de alta tensão DC para detectar fissuras e trincas em superfícies

contaminadas. O comportamento de dielétricos de duas fases sob tensão DC e AC submetidas a envelhecimentos acelerados foi estudado. As distribuições estatísticas de tempos para quebra são representadas com distribuições de Weibul¹⁶.

2.3.3 – Desempenho e Aspectos Ambientais

No que se refere aos aspectos ambientais, pode-se considerar que as partículas de materiais de produtos químicos, oriundas de poluição industrial, podem depositar na superfície úmida ou não dos isoladores, tornando-a condutiva quando em contato com a umidade da atmosfera e, por conseguinte, reduzindo suas características isolantes.

Quando se compara aos isoladores de porcelana, os isoladores poliméricos apresentam grande vantagem, uma vez que não necessitam da aplicação de pasta de silicone sobre sua superfície, pela própria formulação de seu revestimento, que é hidrofóbico, sendo que mesmo para durabilidades menores o custo operacional continua vantajoso.

Um estudo, realizado por Awad¹⁷ e colaboradores, comparou o desempenho de isoladores de borracha de silicone e de porcelana expostos em regiões de poluição industrial de fertilizantes. Foi observado que os isoladores de borracha apresentaram boa capacidade isolante após a exposição, com tempo de 2 anos, quando comparados aos de porcelana. Os isoladores de porcelana, sendo hidrofílicos, não mostraram mudanças no ângulo de contato após a exposição, como era esperado. Por outro lado, os de borracha, apresentaram perda do carácter hidrofóbico após a exposição. No entanto, após a remoção da poluição por um processo de lavagem esses isoladores apresentaram ângulo de contato um pouco menor que quando comparados aos isoladores de borracha de silicone novos, em torno de 90% em relação ao isolador sem exposição.

Um outro estudo¹⁸ foi realizado comparando isoladores de Silicone e EPDM, 69 kV, através da técnica de névoa limpa, para investigar o comportamento elétrico desses isoladores artificialmente contaminados, como função do tempo de descanso (intervalo entre a aplicação da contaminação e o início do ensaio). Para esse ensaio, a tensão aplicada foi mantida constante, variando a severidade da contaminação e o tempo de descanso. Por meio de ensaios de “flashover”(Figura 3.1a), foi demonstrada a transferência da hidrofobicidade através da fase contaminante. Resultados de MEV mostraram que o tempo

de descanso exerce pouca influência no desempenho elétrico para EPDM, porém para o silicone o tempo de descanso aumentou drasticamente suas propriedades elétricas, devido a alta hidrofocidade. Neste caso, o tempo de descanso reduziu a fase de contaminantes, o que pode ser explicado porque o silicone, mesmo com alto grau de molhabilidade pode suportar a voltagem aplicada sem ocorrência de “flashover”.

Ensaio secos, úmidos e de poluição foram aplicados para investigar a influência de fixadores ou aletas no desempenho de isoladores poliméricos. Considerando a molhabilidade de polímeros, foram simuladas condições hidrofóbicas e hidrofílicas. Foi encontrado que o modelo de aletas e seus arranjos têm predominante influência na tensão de “flashover” de isoladores sob poluição e umidade. No entanto, a distância de escoamento não é um parâmetro tão crucial para o desempenho de isoladores sob poluição. Ao contrário, aumentando a distância de escoamento muito, por excessiva adição do número de saias e alargando o diâmetro da saia, pode-se abaixar o desempenho de isoladores, sob poluição e umidade ¹⁹.

Outros vários estudos discutem os efeitos das mais variadas condições de poluição^{20, 21}, tais como tempestades de saís ²², névoa salina ²³ e severas condições marítimas^{24 25} no desempenho dos isoladores poliméricos.

2.4 – Fenômenos de “flashover” e Corrente de Fuga

Outros fatores importantes quando se trata de isoladores, são os fenômenos de arco de corrente de fuga e de “flashover” ²⁶. Este último consiste na ignição simultânea de todo o material combustível (depositado sobre o isolador) em uma área próxima. Por se tratar de um fator que afeta o desempenho, o “flashover” tem sido estudado por muitos autores, principalmente, para isoladores poliméricos, já que estes, mostram-se mais susceptíveis à ocorrência do fenômeno por acumularem mais poluição que a porcelana. Após longo tempo de exposição dos isoladores ao ambiente, percebe-se a deposição de uma camada fina de poluição composta de uma mistura de poeira, saís e óleos de silicone. O “flashover” forma-se a partir dessa camada de poluente (cargas e produtos químicos) a presença de névoas ou gotas de orvalho propicia a formação de regiões condutivas. Desenvolvem-se, então, manchas nas regiões nas quais a hidrofobicidade é reduzida e,

assim formam-se, simultaneamente os arcos de bandas secas na haste do isolador. Dois arcos juntos levam ao “flashover”, que é significativamente maior para isoladores poliméricos do que em isoladores de porcelana²⁷. Corroborando com os estudos de Karady²⁷, Vlastos²⁸ relata que as superfícies de isoladores poliméricos possuem comportamento mais dinâmico que os de porcelana ou vidro e sofrem uma série de transições que podem ser cruciais para a atividade de descarga, nas quais há um aumento no risco de “flashover” e danos superficiais. Os resultados obtidos das correntes de fuga e do desempenho de isoladores comerciais constituídos de EPDM e silicone mostram diferenças atribuídas às famílias de materiais²⁸.

Outro estudo de desempenho, conduzido por Gorur e Shead²⁹ avaliou isoladores poliméricos, de EPDM e de Silicone, baseado em propriedades como resistência superficial, falha elétrica e tensão de “flashover”. Os isoladores de EPDM ficaram em campo por 13 anos e os de silicone, por 7 anos, em região subtropical relativamente limpa. As análises evidenciaram perdas de propriedades, comparadas às dos novos, mas a funcionalidade de ambos os tipos de isoladores permaneceu aceitável, uma vez que a capacidade, proteção de depósitos poluentes na superfície, foi maior que a encontrada no nível de contaminação do campo.

A corrente de fuga e o “flashover”, centelha ou arco, foram estudados³⁰ para isoladores envelhecidos em campo, sob vapor de névoa e ensaios de tensão aplicados sob chuva. As amostras foram energizadas com altas tensões DC e AC por aproximadamente nove anos. Os desempenhos foram comparados com isoladores idênticos, expostos ao ambiente sem energização e outros guardados em locais cobertos. As correntes de fuga foram estudadas para três diferentes condições dos isoladores, isto é, conforme recebido do campo, depois de lavados e finalmente depois da aplicação de tensão. Entre as medições, os isoladores descansavam por uma semana. Os resultados mostram que as correntes de fuga para os de silicone foram geralmente menores que para os de EPDM. Em ambos os casos, as correntes de fuga para os guardados em áreas cobertas foram menores que os expostos ao intemperismo. Os ensaios de tensão aplicada mostram uma relação quase linear entre a tensão de “flashover” e a distância do arco dos isoladores. Em geral, para isoladores similares de EPDM e silicone, a tensão de “flashover” para silicone foi maior que para EPDM.

Ao lado das condições climáticas, a geometria do material isolador também afeta o comportamento do “flashover” em isoladores poliméricos. Isto foi evidenciado em estudo conduzido por Gorue e De La³¹ que mostraram o mecanismo de “flashover” e o desempenho de isoladores poliméricos de silicone e de EPDM com diferentes geometrias e contaminados sob condições de névoas e chuvas.

Do que foi exposto anteriormente, pode-se inferir que os isoladores de silicone oferecem um melhor desempenho em relação à formação de correntes de fuga e tensão de “flashover”.

2.5 – Mecanismos Responsáveis Pela Perda de Hidrofobicidade do Isolador

Outro aspecto de interesse é a abordagem dos mecanismos que levam à perda de hidrofobicidade dos materiais isoladores. Procurando elucidar os fatores envolvidos nesse fenômeno, vários autores têm avaliado o comportamento desses isoladores sob as mais diversas condições ambientais, bem como a perda temporária da hidrofobicidade devido às descargas elétricas ou o seu aumento devido às radiações gama. A seguir, será feita uma breve discussão desses estudos.

Experiências em campo e laboratoriais mostram que as superfícies de isoladores de SIR e EPDM perdem sua hidrofobicidade inicial tornando-se hidrofílicos quando expostos aos arcos de banda seca. Pela exposição do material em ambiente úmido e contaminado, o material pode perder a hidrofobicidade na superfície devido à reorientação dos grupos hidrofóbicos metilas. No entanto, a borracha de silicone pode restabelecer sua hidrofobicidade devido à difusão do material da massa interior (plastificantes e cargas) e pela reorientação de grupos hidrofóbicos na superfície dos isoladores. Mudanças estruturais dos materiais afetam a propriedades hidrofóbicas e também o desempenho elétrico dos isoladores.

Blackmore e Birtwhistle³² fizeram investigações experimentais de descargas superficiais que ocorrem na superfície de isoladores poliméricos. As descargas de superfícies parcialmente hidrofóbicas ocorrem em bandas secas bem definidas, enquanto descargas sobre superfícies bem hidrofóbicas aparecem como pequenos pontos de luz

ocorrendo entre discretas gotas de água. Estas descargas produzem uma perda localizada de hidrofobicidade e são estáveis à pressão atmosférica. As descargas são caracterizadas por voltagem em alto catodo numa coluna positiva, dependendo da corrente de descarga. Uma técnica é apresentada para medir a taxa na qual a hidrofobicidade do polímero é perdida devido à ação desse tipo de descarga. Foi encontrado que a perda de hidrofobicidade ocorre predominantemente na região do catodo.

De acordo com estudos iniciados em 1987 em uma estação de ensaio em Anneberg (Suíça), fez-se uma comparação de desempenho quanto a picos de corrente de fuga excedendo 25 mA, de sete isoladores comerciais de EPDM, silicone e de porcelana energizados. Os resultados mostram que a borracha de EPDM perde sua hidrofobicidade inicial em período de tempo relativamente pequeno de exposição ambiental e resultando em substancial corrente de fuga e arco intenso, sob condições úmidas e de poluição. Por outro lado, os isoladores de silicone mantêm sua resistência superficial alta e corrente de fuga baixa. Durante o ambiente salino, a magnitude da corrente de fuga do EPDM é geralmente maior que a da porcelana. No entanto, o isolador de silicone altamente tensionado pode, sob severas condições, perder sua resistividade superficial, resultando em considerável arco superficial^{33, 34, 35, 36}.

A perda temporária da hidrofobicidade de alguns isoladores poliméricos, e de revestimentos foi estudada por um grupo australiano³⁷. Certos tipos de descarga elétrica causaram uma substancial perda de hidrofobicidade para EPDM, PTFE - Politetrafluoretileno e Silicone; surpreendentemente, também foi observado um grande ganho desta propriedade. O tempo do processo de recobrimento da superfície foi determinado para vários isoladores comerciais; também foram discutidos alguns aspectos de degradação, mecanismos de reparos e alguns aspectos práticos³⁷.

Das-Gutta³⁸ relata que o processo de molhabilidade nestes materiais é, em geral, pouco estudado. Em seus estudos, ele observou que uma dose de irradiação gama reduz a absorção de água e a condutividade superficial de natureza ôhmica a baixos ou moderados campos, enquanto em campos maiores essa relação é não linear³⁸.

Baseado nesses estudos, é possível visualizar a complexidade desses fenômenos e de seus mecanismos e ao mesmo tempo esclarecer o seu entendimento conduzindo a uma

melhor exploração das características e propriedades dos materiais isoladores, com intuito de aumentar a sua eficácia na utilização.

2.6 – Avaliação dos Isoladores em Campo – Inspeções

Os isoladores poliméricos são menos vulneráveis ao vandalismo, por não serem estilhaçados por tiros, por exemplo. Porém, quando comparados aos de porcelana e de vidro, apresentam maior dificuldade de visualização dos defeitos quando inspecionados à distância.

Desta maneira, inspeções são necessárias visando à prevenção de problemas de desligamento da linha, devido a defeitos nos isoladores, já que não se dispõe de uma maneira de prever a vida útil em campo desses isoladores poliméricos. Nesse sentido, anseia-se pela existência de normas ou conjunto de dados que possibilitaria, durante a inspeção, detectar a ocorrência de descarga em um determinado isolador e proceder a sua substituição, prevenindo futuros defeitos na linha.

2.6.1 Tipos de Inspeção

De uma maneira geral, os modos de inspeção são de três tipos, sendo duas por terra e uma aérea. As inspeções por terra são divididas em inspeção simples e minuciosa. A primeira é realizada a cada seis meses, ou mais constantemente de acordo com o crescimento rápido de árvores, bambus ou outro fator de risco iminente para a linha. Nesse tipo de inspeção, não se faz obrigatória uma subida do inspetor na estrutura ou torre; são detectados os defeitos que colocam a linha em risco imediato, como presença de árvores ou isoladores quebrados, entre outros. Já na inspeção minuciosa, o inspetor deve subir nas torres, uma a uma, fazendo uso de binóculos. A periodicidade dependerá da idade da linha e do histórico, sendo normalmente realizada a cada três anos. Porém, ainda nesse tipo de inspeção, a visualização pode ser comprometida, uma vez que o inspetor observa somente o lado do isolador voltado para ele e até onde sua altura pessoal permite.

Um outro tipo de inspeção é a chamada inspeção aérea, que é realizada com termografia; porém, em alguns casos, há inspeção por termografia juntamente com a visual. Nesse último caso, o termovisor fica acoplado na fuselagem do helicóptero. Por meio desse

equipamento é possível detectar defeitos nos isoladores, na interface metal - aleta e também no corpo polimérico, por infravermelho. No entanto, em alguns casos faz-se necessária uma função do inspetor, uma vez que não se podem observar detalhes da degradação desses isoladores. Pode-se fazer uma inspeção aérea ainda mais minuciosa, realizada a 15 km/hora, com filmagem de toda a estrutura numa determinada área, porém os custos tornam-se muito elevados.

2.6.2 - Procedimentos operacionais de retirada e instalação de isoladores

Quanto aos procedimentos operacionais de retirada e instalação de isoladores, as observações realizadas vão contribuir no sentido de se avaliar que procedimentos podem influir, negativamente, no desempenho futuro do isolador instalado. Exemplos ilustrativos referentes aos procedimentos de retirada e instalação de isoladores, na linha Areembepe-Guarajuba com estrutura de concreto, encontram-se no Anexo A. Constata-se que uma das fases está com isolador de vidro e as outras duas com poliméricos. Isso ocorre em virtude de muitas vezes se substituir somente os isoladores que foram danificados por vandalismo, permanecendo os restantes que deram origem às redes, com convivência de isoladores de diferentes materiais.

Observou-se que os isoladores novos não vêm acondicionados em caixas. Eles são colocados no caminhão da empreiteira junto com outros materiais de trabalho que podem danificá-los.

Na região do pólo petroquímico de Camaçari, também foram retiradas amostras de uma linha 69 kV, com torres metálicas. Figuras ilustrativas dos detalhes das substituições dos isoladores (A2, A3 e A4) e também da região industrial (A5), encontram-se no Anexo A.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais e Métodos (Parte I)

Os métodos utilizados nesse trabalho foram divididos em duas seções: levantamento para avaliação do desempenho de isoladores em campo e o envelhecimento artificial acelerado de isoladores novos e mantas dos materiais poliméricos.

Um dos fatores que motivaram os estudos desenvolvidos nesse trabalho foi a não existência de estatística do percentual de isoladores poliméricos, retirados de campo por ocorrência de defeitos, e a falta de informações conclusivas dos modos de falha desses isoladores.

Hoje está sendo desenvolvido pelo CPqD em campo um protótipo de sensor, por corrente de fuga, para degradação de isoladores poliméricos.

A amostras de isoladores poliméricos foram retiradas de locais com diferentes condições ambientais, dentre as quais podem-se citar: regiões com alto índice de salinidade, próximas a orla marítima; áreas com poluição industrial, como no pólo petroquímico de Camaçari; regiões áridas, como sertão da Bahia; e na região oeste desse estado, no qual existe maior nível de descarga atmosférica e de umidade.

3.1.1 Levantamento dos tipos de defeitos encontrados em isoladores poliméricos em campo

A primeira etapa, do presente estudo, consistiu na coleta de informações acumuladas no decorrer dos anos, a respeito de isoladores retirados de campo com estados de degradação observáveis. Os dados foram obtidos da companhia de eletricidade da Bahia (COELBA) devido a grande experiência desta empresa, acumulada nos últimos anos.

3.2 - Materiais e Métodos (Parte II)

Nesta segunda etapa do trabalho, foram realizados os ensaios de envelhecimento acelerado para os isoladores novos e mantas elastoméricas, utilizados em linhas de transmissão de 69 KV. Um estudo comparativo foi feito entre os produtos coletados em campo e os produtos novos, envelhecidos artificialmente em laboratório. Para as análises, foram utilizadas as metodologias aplicadas a polímeros.

3.2.1 - Materiais

Os materiais utilizados nessa etapa do trabalho foram os isoladores poliméricos, compostos de borracha de etileno propileno dieno (EPDM). Também foram analisadas mantas elastoméricas de silicone e mantas de borracha de etileno propileno (EPDM) preparadas com o mesmo material e tipo e de processamento dos isoladores usados em linhas de transmissão de até 69 kV.

Nas Tabelas do Anexo B, encontram-se listadas as principais características e propriedades desses materiais poliméricos (EPDM e Silicone), fornecidos pelo fabricante.

3.2.2 – Métodos

Os isoladores foram retirados de campo e analisados, e suas características estão listadas no Anexo C. Os isoladores cuja numeração é 1, 2, 3, 6 e 7 foram retirados de campo em 2002 (Anexo C – Tabela C1), enquanto que os numerados como 4 e 5 são os novos. A identificação de 08 a 12/2002 indica isoladores novos (80 kV) e o numerado como 13/2003 indica isolador usado (120 kN), com mais de 9 anos de campo e disponibilizado para descarte. Na Tabela C2 do Anexo C, constam os isoladores, 69 kV e 120 kN, cujo diâmetro das aletas é maior e mais largo. Esses isoladores, utilizados em ensaios de alta tensão, foram retirados de campo e entregues em março de 2003.

As amostras das mantas utilizadas nos ensaios específicos (resistividade superficial e volumétrica; dureza; densidade, e rugosidade) foram preparadas nas dimensões de 25 cm x 25 cm, com 3 cm de espessura. A vulcanização destas mantas foi realizada nas mesmas condições dos isoladores.

Para a caracterização dos materiais estudados, foram realizados ensaios de envelhecimento ao intemperismo artificial (QUV); ensaios de envelhecimento térmico, bem como testes de envelhecimento em água e em névoa salina.

As temperaturas de ensaio para os envelhecimentos térmicos foram 120° C para isoladores, e 100 °C e 120° C para as mantas poliméricas de EPDM e Silicone respectivamente. Os ensaios de envelhecimento em água foram feitos a 30° C; e os ensaios em névoa salina foram conduzidos em temperatura de 35°C com umidade relativa de 90%, e concentração de NaCl de 5%.

O Envelhecimento em Intemperismo Artificial (QUV), para os isoladores poliméricos, seguiu a norma ASTM G154³⁹. As amostras foram submetidas a ciclos com 22 horas de radiação ultravioleta A, e 2 horas de condensação. A intensidade da radiação emitida pelas lâmpadas foi monitorada através de um espectrofluorímetro. Em torno de 3200 horas de uso, adota-se um procedimento padrão, em que as mesmas lâmpadas são substituídas devido o término de sua vida útil. A faixa de temperatura utilizada nos ensaios variou entre 48°C e 58°C e a média da umidade relativa ficou em torno de 50%, sendo que esta última foi mantida em torno de 48% durante aproximadamente 12 horas e, em torno de 78% após a condensação.

Para as mantas elastoméricas, o ensaio de QUV foi mantido à temperatura de 60°C durante a irradiação, e 50°C durante a condensação.

O ensaio de envelhecimento por tensões elétricas e com umidade (tensão disruptiva) foi realizado segundo os requisitos da norma NBR 6936⁴⁰.

Os ensaios de envelhecimento, acelerado ou artificial, tiveram duração de 3 meses e foram realizados utilizando-se os equipamentos listados na Tabela 3.1

Tabela 3.1 –Tipos de Testes de Envelhecimento utilizados nas mantas poliméricas e isoladores novos.

ENSAIOS	EQUIPAMENTOS
Envelhecimentos Térmicos	3 Muflas Fanem, BDs, 1609, 19307, 1416 *
Envelhecimento em Névoa Salina	Câmara de Névoa Salina Bass Equipamentos Ltda, Modelo USC-MP-02/Moderniz 2001, BD 8094, 1279 *
Envelhecimento em Água	Tanque com água **
Envelhecimento em Intemperismo Artificial (QUV)	Câmara de Intemperismo QUV, Comexim, lâmpada fluorescente *
Envelhecimento em Intemperismo Artificial (QUV)	Câmara de Intemperismo QUV, lâmpada fluorescente * (PUC - Campinas)

* com verificação interna

** sem verificação interna

As amostras de isoladores, sem envelhecimento, com envelhecimento natural e com os diferentes envelhecimentos acelerados, passaram por ensaios elétricos e, posteriormente, pelos ensaios mecânicos de tração. Após isto, os isoladores foram destruídos e as amostras adequadas obtidas foram distribuídas para os demais ensaios e medições de acompanhamento de degradação ou de diagnóstico.

Na Tabela 3.2 estão listados os tipos de ensaios de caracterização e os equipamentos utilizados para esse fim.

Tabela 3.2 –Caracterização dos Materiais e Equipamentos Utilizados

Ensaio / Medições	EQUIPAMENTOS
Elétricos de Alta Tensão – na UNICAMP-LAT-FEEEC (não serão discutidos neste trabalho)	Sistema para aplicação de Alta Tensão; Voltímetro de Pico marca Haefely, tipo 64M, com indicador digital com verificação interna antes do ensaio. Osciloscópio Digital Tektronix, TDS 520C, 500 MHz, 1 GS/s. Multímetro Fluke 87, BD 20864 ***
Corrente de fuga - na UNICAMP-LAT-FEEEC (não discutidos neste trabalho)	Multímetro Teknotronix
Resistividade superficial e volumétrica	Medidor de alta impedância BD9847, HP 4329A, Célula de resistividade, HP 16008 A, tolerância de +/- 5% ***
Rugosidade	Rugosímetro Taylor – Parâmetro R_A Hobson Surtronic 3, BD1232 ***
Ensaio de Tração	Máquina Universal de Ensaio MTS 810, BD-20656, com verificações internas antes do ensaio, para os Isoladores; Máquina Universal de Ensaio Kratos, K2000MP, BD16154, para as Mantas, Micrômetro Tesa, Isomaster, BRA-74/009-039 e Paquímetro Tesa, BRA-74/009-018
FTIR	Espectrofotômetro Infravermelho com Transformada de Fourier marca Nicolet, modelo Magna 550, BD 18385, com Microscópio InspecIR, BD 2054, acoplado ***
MEV/MA	Microscópio eletrônico de varredura, Jeol, JSM, 5800 LV, com Módulo de Microanálise – Noram, CPQD16919 ***
Dureza Shore	Durômetro Shore A ***
TGA	Equipamento de Análise Termogravimétrica, TGA TA Instrumentos ***
DSC dinâmico	Equipamento de Calorimetria Exploratória Diferencial, DSC 910 TA Instruments
DMTA	Equipamento de Análise Térmica Dinâmico Mecânica (DMTA), Rheometric, BD 019086***

*** com verificação interna antes do ensaio

Capítulo 4 - Resultados e Discussões

Com a retirada dos isoladores poliméricos, após a detecção de defeitos, foi possível fazer um levantamento das possíveis falhas que podem ser encontradas. Com os dados obtidos, pode-se realizar um estudo que esclarecesse o processo de degradação e, como consequência, prevenir falhas com certa antecedência, facilitando principalmente os processos de inspeção.

4.1 Tipos de defeitos encontrados em levantamento realizado para isoladores poliméricos em campo

A seguir, são enumeradas algumas dessas informações com fotos, ilustrando os tipos de defeitos encontrados. Essas fotos foram reproduzidas do arquivo da COELBA, com o consentimento da mesma.

Dentre os defeitos observados, os de isolação são mais facilmente detectáveis, porém a deterioração do isolador não é acompanhada a tempo hábil. Sendo assim esse tipo de degradação normalmente seria observável caso o isolador fosse inspecionado de perto, já que o grau de destruição da peça é muito aparente.

A Figura 4.1a ilustra um tipo de falha ocorrida em uma linha, numa região de alto grau de poluição química, com a ocorrência de destruição das aletas de isoladores de EPDM com 3 anos de instalação em campo. O isolador degradado foi localizado pela ocorrência sistemática de falhas na linha, e pela observação da fumaça emitida pela torre/isolador. Esta fumaça, composta de enxofre e água, deu origem ao ataque agressivo do ácido sulfúrico formado na parte inferior do isolador, corroendo toda a região da aleta que esteve em contato com a fumaça.

A Figura 4.1b mostra um isolador com processo de “esfarelamento” do material das aletas provavelmente causado por altíssimas correntes de fuga.

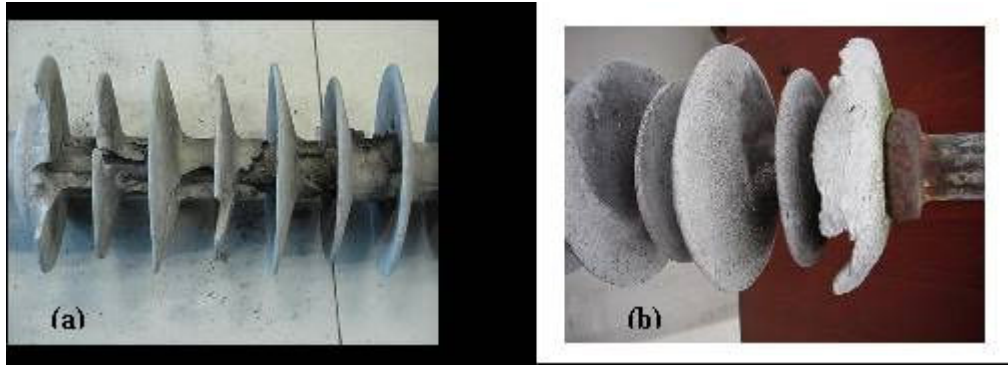


Figura 4.1- Isoladores Elétricos com Aletas Danificadas:

a) “Flashover” , b) Esfarelamento por corrente de fuga.

Também foram observados casos de aletas sem aderência em relação ao bastão de fibra de vidro, o que pode facilitar a ocorrência de descargas parciais e correntes de fuga pela parte interna do mesmo, ao invés do caminho projetado pelas aletas. O mesmo pode ocorrer se houver penetração de umidade na interface metal/fibra ou fibra/aletas. Um exemplo drástico de ocorrência de falha na interface metal/fibra pode ser observado na Figura 4.2. Nela, vê-se que o bastão se soltou deixando as fibras expostas em forma de “vassoura”, provavelmente em função de uma descarga elétrica, propiciando a falha em um isolador já previamente degradado. Sabe-se que as interfaces do bastão de fibra de vidro com as aletas poliméricas e do bastão mais aletas com metal são importantes, uma vez que vários são os processos de fabricação e vários tipos de interfaces fibra/polímero e metal/fibra, com a aplicação de colas, prensagem, extrusão e injeção.



Figura 4.2 – Detalhe da Região do Isolador Elétrico com fibras de vidro expostas

A prática de colagem de isoladores, ou colagem entre suas aletas, pode ocasionar perda da sua aderência com o passar do tempo e, conseqüentemente, diminuição da sua vida útil. Processos como vulcanização, a altas e baixas temperaturas, podem também ser empregados.

Sendo os isoladores constituídos por compostos poliméricos a base de materiais distintos (cargas e resinas), como consequência são capazes de suportar diferentes temperaturas e possuírem diferentes contrações.

Essas propriedades características podem dar margem à ocorrência de falhas, caso seu processo de fabricação e suas matérias primas não forem confiáveis e seguras.

Assim, o processo de fabricação é de suma importância para que haja um bom desempenho desses isoladores.

A Figura 4.3 mostra um isolador com queima aparente da parte metálica, perda da galvanização, e degradação da aleta e bastão de fibra de vidro, provavelmente, pela ocorrência de “flashover”. Um isolador onde ocorreu “flashover” estará possivelmente degradado, pela energia e calor envolvidos, devendo ser preventivamente retirado de campo para evitar futuros desligamentos da linha. A grande questão associada é como se identificar tal ocorrência em um determinado isolador. De qualquer maneira, ensaios e medições laboratoriais provocando “flashover” em amostras novas, para se avaliar o grau de danos e maneiras de identificação de ocorrência antecipada, passam a ser um tema de grande interesse a ser pesquisado, pois envolve segurança. Procura-se, portanto, desenvolver um método que possibilite a visualização durante a inspeção, ou obter indicação de que o isolador já foi atingido por descarga, com formação de arco de potência (flashover).

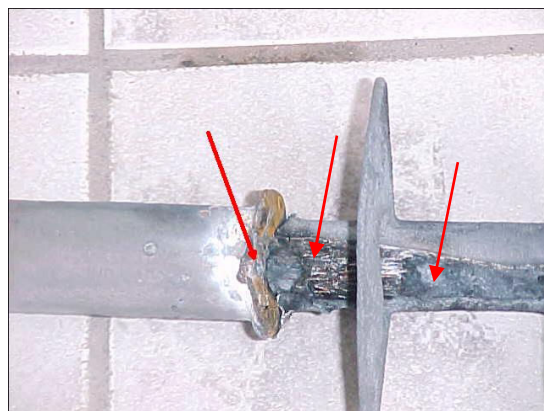


Figura 4.3 – Isolador elétrico com danos na parte metálica/ bastão/aleta

Ocorrências de descargas em isoladores, que deixam marcas visíveis, também foram observadas. Por meio da Figura 4.4b, pode-se observar marcas no bastão que aparecem na parte central do isolador, o que pode ser devido a falhas nas interfaces. Na Figura 4.4b, essas marcas aparecem por todo o isolador, provavelmente devido a descargas parciais, que ocasionaram degradação da superfície do mesmo e propiciaram o “flashover” em determinado momento. Nesses casos, ensaios laboratoriais podem esclarecer esse tipo de comportamento e propiciar métodos de antecipar a observação de falhas, que irão causar ocorrências mais graves.

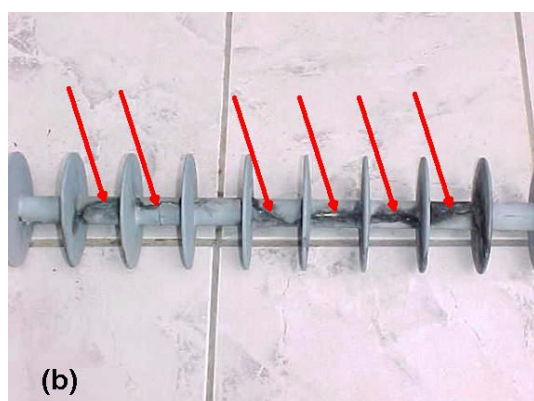


Figura 4.4b - Isolador elétrico com descarga aparente

Os casos relatados anteriormente, referem-se a degradações bastante significativas, implicando numa situação de falha, ou pré-falha, bem caracterizada para o isolador. No entanto, muitos outros processos de degradação podem ocorrer, levando à falhas do mesmo, que não são tão facilmente observáveis a olho nu ou à distância. As análises desses casos são fundamentais, para que haja um conhecimento dos processos que levam à degradação dos elementos do isolador; em que situações isso ocorre e, principalmente, quais os indicadores que poderiam ser levantados para se prever o tempo de vida útil do mesmo.

Nesse sentido, foram observados alguns processos de contaminação dos isoladores em campo que, somados aos casos relatados na literatura conforme Capítulo 2, fornecem subsídios para avaliação de sua degradação.

As Figuras 4.5a e 4.5b ilustram, respectivamente, um isolador retirado de uma região próxima à orla marítima, com aparência de contaminação na superfície e com marcas supostamente de correntes de fuga; e outro retirado de região com poluição industrial, mas com formação também de limo na superfície. Esse isolador apresenta ainda manchas vermelhas de tinta de respingos da pintura da torre; ou seja, um tipo de contaminação promovida pelo próprio processo de manutenção das estruturas metálicas.

Em se tratando de composto de EPDM, um material hidrofílico, um fator importante que deve ser levado em conta é o local de sua instalação; pois regiões com alta poluição salina e industrial acabam acarretando degradação da superfície desses isoladores. Disso resultam erosão, “*tracking*”, ou trilhamento, e posterior aumento da corrente de fuga, principalmente quando associado ao aumento da umidade da superfície. A ocorrência desse processo é mais difícil no composto de silicone, devido às suas características como a baixa hidrofobicidade, que torna a resistência superficial do isolador alta, mesmo em condições de chuva. Com isso, são evitadas a formação de filmes contínuos de água e a formação de arcos no isolador, reduzindo assim o risco de “flashover”. No caso de poluição salina, chuvas abundantes podem favorecer a inibição dessa contaminação pela “lavagem” do isolador. Já em regiões com alta umidade, mesmo sem poluição, pode haver o aparecimento de limos e fungos, casos já relatados na literatura e também observados em campo.

Na região do Recôncavo Baiano, com alta umidade relativa do ar, observou-se a formação de fungos com manchas pretas aparentes na superfície do isolador, que podem vir a aumentar os níveis de descargas parciais quando associadas à umidade. Outro fenômeno observado, principalmente em isoladores com formulação EPDM, é a produção do esbranquiçamento ou “gizamento” do isolador.

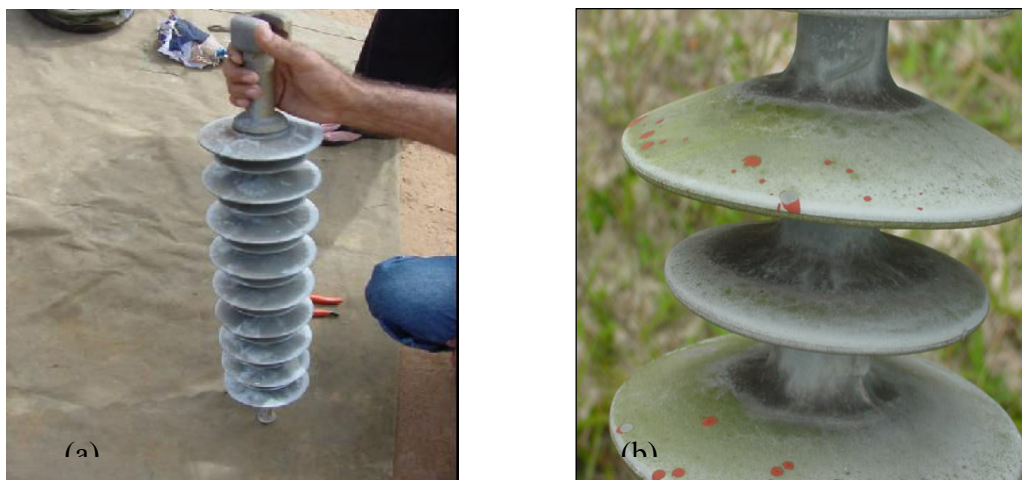


Figura 4.5 – Isoladores elétricos retirados de orla marítima (a) e pólo petroquímico (b)

4.2 Envelhecimento Térmico

As amostras de isoladores novos de EPDM foram envelhecidas por 3 meses a 135°C, em estufa com circulação de ar. As amostras de mantas poliméricas de EPDM e de Silicone passaram por envelhecimentos térmicos respectivamente nas temperaturas de 100°C e 120°C, em estufa com circulação de ar.

Após o envelhecimento térmico não foram observadas alterações visuais tanto para os isoladores como para as amostras de mantas.

4.3 Envelhecimento em Névoa Salina e em Água

A Figura 4.6 ilustra um isolador após dois meses de envelhecimento em névoa salina (35 °C, 90% de umidade e 5% NaCl). Observaram-se áreas com corrosão e extenso depósito do sal branco nas ferragens dos isoladores.



Figura 4.6: Após dois meses, aspecto das ferragens de isoladores novos envelhecidos em névoa salina (35°C, 90%UR e 5% NaCl), apresentando corrosão vermelha e depósito salino

As amostras que permaneceram em câmara de névoa salina por 90 dias apresentaram, em 2 dias de ensaio, corrosão branca e, após 11 dias, foi observado o aparecimento de corrosão vermelha nas extremidades dos isoladores.

O carbonato básico de zinco, que resulta da corrosão por oxidação natural em atmosfera seca e não poluída das superfícies galvanizadas, cobriu completamente a superfície metálica do isolador novo. Com isso, ele protegeu a mesma por retardar a corrosão e permitir que o filme formado fosse aderente, protetor e não poroso. Já na presença de atmosfera úmida, saturada de ácido carbônico, há um aumento acentuado na taxa de corrosão, cujo produto formado (oxidação branca do aço galvanizado) não protege a superfície, pois não é aderente e é bastante poroso.

Para as amostras de mantas poliméricas e isoladores, não foram observadas alterações visuais significativas após o envelhecimento em névoa salina, conforme esperado para o material polimérico; no entanto, fez-se este ensaio para que fossem avaliadas as alterações nas propriedades de superfície, como resistividade superficial, rugosidade e trilhamento elétrico.

Para as amostras de isoladores, bem como para as mantas poliméricas, não foram observadas alterações visuais significativas, após três meses de submersão em água a 30 °C.

4.4 Envelhecimento em Intemperismo Artificial (QUV)

Como os isoladores permanecem sob a ação do intemperismo, fez-se um acompanhamento da ação da irradiação UV sobre os mesmos, pois já é bem conhecida a ação desta radiação sobre certos materiais poliméricos utilizados em ambientes externos. Verificou-se que após dois meses de envelhecimento, as amostras de isoladores não apresentaram alterações visuais significativas na parte polimérica, constatou-se apenas um leve gizamento branco nas aletas e perda do brilho das ferragens; o gizamento branco pode ser devido à migração da carga inorgânica à superfície, confirmado por ensaios de MEV com sonda de microanálise.

Para as amostras de mantas de EPDM observou-se descoloração muito acentuada passando para cinza bem mais claro que o original, o que é indicativo de degradação mais

acentuada nas mantas, que ficaram com uma área maior de exposição à radiação ultravioleta do que a área dos isoladores, pois devido sua dimensão a lâmpada não conseguia atingir toda superfície.

4.5 - Ensaio de Resistividade Superficial e Volumétrica para Mantas Elastoméricas e Isoladores

O estudo da resistividade superficial e volumétrica é importante para avaliar propriedades de superfície, susceptíveis à degradação. As Tabelas 4.1 a 4.4 mostram os resultados encontrados nas medições de Resistividade Superficial, σ em $\Omega \cdot \text{cm}$, e Volumétrica, ρ em $\Omega \cdot \text{cm}^3$, nas Mantas Elastoméricas de EPDM e de Silicone, nas seguintes condições: Tensão aplicada: 500 VDC; Tempo de polarização: 1 minuto; Temperatura ambiente: 25°C; Umidade relativa do ar ambiente: 68% U.R..

Tabela 4.1: Resultados encontrados nas medições de Resistividade Superficial, σ , para mantas de EPDM após os envelhecimentos, bem como as variações

Mantas EPDM	Rs	Rs após envelhecimentos	σ	σ após envelhecimentos	$\Delta\sigma$
Amostra	E+12 Ω	E+12 Ω	E+12 $\Omega \cdot \text{cm}^3$	E+12 $\Omega \cdot \text{cm}^3$	
1A (100°C)	1000,00	>10.000,00	18800,00	>188.000,00	>169.200,00
2A (100°C)	5000,00	10.000,00	94000,00	188.000,00	94.000,00
2B(100°C)	2000,00	1.400,00	37600,00	26.320,00	-11.280,00
3A(100°C)	2000,00	>10.000,00	37600,00	>188.000,00	>151.000,00
3B(100°C)	*	1.000,00	$> 10^{15}$	18.800,00	$\sim (-1000)$
4A(QUV)	800,00	>10.000,00	15040,00	>188.000,00	>173.000,00
4B(QUV)	*	>10.000,00	$> 10^{15}$	>188.000,00	$\sim (-1000)$
5A(QUV)	2000,00	3.000,00	37600,00	56.400,00	18.800,00
6A(QUV)	*	0,65	$> 10^{15}$	>188.000,00	$\sim (-1000)$
6B (NS)	*	700,00	$> 10^{15}$	13.160,00	$\sim (-1000)$
7A (NS)	2000,00	>10.000,00	37600,00	>188.000,00	> 151.000,00
7B (NS)	3000,00	>10.000,00	56400,00	>188.000,00	>132.000,00

A= Lado menos rugoso

B= Lado mais rugoso

Tentando encontrar uma correlação entre os comportamentos observados para as propriedades de superfície rugosa e resistividade; considerando-se o lado da amostra identificado como mais rugoso e onde foram realizadas as medições elétricas de

resistividade, pode-se observar que com os envelhecimentos, há tendência de diminuição da rugosidade e de aumento na resistividade superficial para EPDM. Isto é bem importante, pois são propriedades de superfície relacionadas a sua afinidade pela água ou não e às correntes de fuga.

A Tabela 4.1 e 4.2 mostram respectivamente, os valores encontrados para as mantas de EPDM e Silicone nas medições de Resistividade Superficial, após os envelhecimentos.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam respectivamente os resultados de Resistividade volumétrica para as mantas de EPDM e Silicone, após os envelhecimentos.

Tabela 4.2: Resultados encontrados nas medições de Resistividade Superficial, σ , para mantas de Silicone após os envelhecimentos, bem como as variações.

Mantas de Silicone	R_s	R_s após envelhecimentos	σ	σ após envelhecimentos	$\Delta\sigma$
Amostra	E+12 Ω	E+12 Ω	E+12 $\Omega.cm^3$	E+12 $\Omega.cm^3$	
1A(QUV)	140,00	>10.000,00	2632,00	>188.000,00	>185.400,00
1B(QUV)	160,00	800,00	3008,00	15.040,00	12.032,00
2A(QUV)	180,00	1.400,00	3384,00	26.320,00	22.936,00
2B(QUV)	180,00	>10.000,00	3384,00	>188.000,00	>185.000,00
4B(QUV)	400,00	1.000,00	7520,00	18.800,00	11.280,00
3A(100°C)	160,00	>10.000,00	3008,00	>188.000,00	>185.000,00
3B(100°C)	140,00	>10.000,00	2632,00	>188.000,00	>185.400,00
4A(100°C)	160,00	>10.000,00	3008,00	>188.000,00	>185.400,00
5A(100°C)	120,00	>10.000,00	2256,00	>188.000,00	>186.000,00
5B(100°C)	160,00	>10.000,00	3008,00	>188.000,00	>186.000,00
6A(NS)	140,00	60,00	2632,00	1.128,00	-1.504,00
6B(NS)	180,00	100,00	3384,00	1.880,00	-1.504,00
7A(NS)	180,00	>10.000,00	3384,00	>188.000,00	>185.000,00
7B(NS)	180,00	120,00	3384,00	2.256,00	-1128,00

A resistividade superficial do silicone, no caso estudado, foi bem menor que a do EPDM. O envelhecimento a 100°C foi o mais agressivo para a manta de silicone, o que indica que o fator temperatura é o principal para a degradação deste polímero nas condições estudadas.

A tendência de aumento na resistividade superficial com a diminuição da rugosidade ou não é relacionada ao tipo de polímero (hidrofóbico – Silicone ou hidrofílico-

EPDM), afetando a possibilidade de maior ou menor acúmulo de impurezas nas superfícies e as propriedades de corrente de fuga dos isoladores.

Tabela 4.3: Resultados encontrados nas medições de Resistividade Volumétrica, ρ , em $\Omega \cdot \text{cm}$, para mantas de EPDM após os envelhecimentos, bem como as variações.

Mantas de EPDM	ρ	ρ após envelhecimentos	$\Delta\rho$
Amostra	E+12 $\Omega \cdot \text{cm}$	E+12 $\Omega \cdot \text{cm}$	
1A(100°C)	3408,70	7.669,57	4.260,87
2A(100°C)	3266,67	8.166,67	4.900,00
2B(100°C)	3563,64	7.127,27	3.563,63
3A(100°C)	3408,70	6.817,39	3.408,69
3B(100°C)	8909,09	7.127,27	-1781,82
1B(QUV)	3266,67	—	—
4A(QUV)	4454,55	5.345,45	890,90
4B(QUV)	5345,45	6.236,36	890,91
5A(QUV)	3563,64	8.901,09	5.337,45
6A(QUV)	5600,00	6.533,33	933,33
5B(NS)	3563,64	4.454,55	890,91
6B(NS)	4454,55	2.672,73	- 1.781,82
7A(NS)	5113,04	2.556,52	- 2.556,52
7B(NS)	5965,22	1.193,04	- 4.772,18

Tabela 4.4: Resultados encontrados nas medições de Resistividade Volumétrica, ρ , em $\Omega \cdot \text{cm}$, para mantas de Silicone antes e após os envelhecimentos, bem como as variações

Mantas Silicone	ρ	ρ após envelhecimentos	$\Delta\rho$
Amostra	E+12 $\Omega \cdot \text{cm}$	E+12 $\Omega \cdot \text{cm}$	%
1A(QUV)	2556,52	5.965,22	3.408,70
1B(QUV)	2450,00	8.166,67	5.716,67
2A(QUV)	3266,67	8.166,67	4.900,00
2B(QUV)	3563,64	12.472,73	8.909,09
4B(QUV)	2672,73	12.472,73	9.800,00
3A(100°C)	2556,52	17.043,48	14.486,96
3B(100°C)	2672,73	445.454,55	442.781,82
4A(100°C)	2672,73	5.345,45	2.672,72
5A(100°C)	2672,73	8.909,00	2.582,83
5B(100°C)	2672,73	5.345,45	2.672,72
6A(NS)	2800,00	1.866,67	- 933,33
6B(NS)	3563,64	1.781,82	- 1781,82
7A(NS)	2556,52	1.704,35	- 852,17
7B(NS)	2556,52	1.533,91	- 1022,61

É válida a mesma observação para as mantas de silicone: através dos resultados encontrados para o lado mais rugoso, observa-se a tendência de aumento na resistividade volumétrica com a diminuição da rugosidade.

O envelhecimento em Névoa Salina, para ambos os materiais, promoveu uma variação negativa na resistividade volumétrica, contrária às demais variações para os outros envelhecimentos. Isto pode ser atribuído às partículas condutoras do sal impregnadas nas mantas.

Os resultados, para os isoladores após envelhecimentos acelerados e natural (retirado de campo), são apresentados tabelas 4.5 a 4.7, para as amostras de isoladores: (1) de campo (Linha Millenium Guarajuba, interior ao bairro); (2) após QUV (3) após envelhecimento térmico; (4) novo; (5) após névoa salina; (7) após água. O envelhecimento é realizado em discos do polímero retirados do isolador.

Tabela 4.5: Resultados encontrados para resistividade superficial para discos de EPDM retirados dos isoladores.

	Rs	σ
Isolador	E+12 Ω	E+12 $\Omega.cm^3$
1 (campo/96)	80,00	1504,00
2 (após QUV)	0,02	0,38
3 (após 120°C)	7,00	131,60
4 (novo)	600,00	11280,00
5 (após NS)	200,00	3760,00
7 (após Água)	2,00	37,60

As mantas de EPDM apresentaram valores de resistividade superficial na faixa de 15.000 até $> 10^{15} \Omega.cm^3$. O valor encontrado para o isolador novo, amostra 4, é compatível com esta faixa de valores. Já os isoladores envelhecidos em campo ou em laboratório apresentaram valores muito pequenos para a resistividade superficial, praticamente zero para as amostras em QUV e em água, bem diferente do encontrado para as mantas de EPDM sob envelhecimentos, que tiveram estes valores bem aumentados, com exceção de duas amostras sob névoa salina. Isto pode ser explicado por degradação do polímero por ocasião da confecção dos isoladores; outro aspecto inerente a este fato é que na confecção

dos isoladores os moldes utilizados tivessem uma rugosidade diferente da dos moldes das mantas.

Os envelhecimentos artificiais, por somente três meses, em QUV, em água e a 120°C, foram mais agressivos para os isoladores sob estes ensaios em relação ao ensaio de envelhecimento natural em campo, por 7 anos, para esta propriedade elétrica, resistividade superficial.

As amostras de isoladores novos e sob envelhecimentos foram submetidas ao ensaio de resistividade volumétrica, cujos resultados encontram-se nas Tabelas 4.6 e 4.7 abaixo. Na Tabela 4.6, foi considerada a espessura t_1 das bordas do disco e na tabela 4.7 foi considerada a espessura t_2 da parte central do disco.

Tabela 4.6: Resultados de resistividade volumétrica encontrados para discos de EPDM retirados dos isoladores, considerando-se espessura t_1 das bordas do disco.

	Rv	t_1	ρ
Isolador	E+12 Ω	cm	E+12 $\Omega.cm$
1 (campo/96)	100,00	0,30	6533,33
2 (após QUV)	4,00	0,29	270,34
3 (após 120°C)	200,00	0,30	13066,67
4 (novo)	180,00	0,30	11760,00
5 (após NS)	80,00	0,29	5406,90
7 (após Água)	40,00	0,29	2703,45

Tabela 4.7: Resultados encontrados, para resistividade volumétrica, para discos de EPDM retirados dos isoladores, considerando-se espessura t_2 próxima do centro do disco.

	Rv	t_2	ρ
Amostra	E+12 Ω	cm	E+12 $\Omega.cm$
1 (campo/96)	100,00	0,72	2722,22
2 (após QUV)	4,00	0,68	115,29
3 (após 120°C)	200,00	0,69	5681,16
4 (novo)	180,00	0,68	5188,24
5 (após NS)	80,00	0,68	2305,88
7 (após Água)	40,00	0,67	1170,15

ρ = valor calculado de Resistividade Volumétrica.

RV=valor de leitura de Resistividade Volumétrica obtido no visor do megohmetro.

t = espessura da amostra.

São válidas as observações quanto à agressividade da água como agente de degradação, pela resistividade volumétrica. A água, o QUV e a névoa salina foram mais agressivos que os 7 anos de campo, quando se considera esta propriedade. Já a resistividade superficial foi bem alterada e a volumétrica não foi, após o envelhecimento térmico.

Vale a pena ressaltar que a parte central do isolador novo perde 50 % da resistividade volumétrica, em comparação com as bordas, proporcional à variação na espessura, o que pode ser pensado no funcional do produto.

4.6 - Ensaios de Rugosidade

Os ensaios de rugosidade foram realizados para isoladores de EPDM comparando-se as características dos isoladores novos, isoladores envelhecidos em campo, envelhecidos por processo acelerado térmico, por névoa salina e QUV. Os resultados de rugosidade foram feitos utilizando-se Rugosímetro Taylor (Hobson Surtronic 3) com parâmetro de medida R_A e estão apresentados na Tabela 4.8.

É válida a observação sobre os resultados encontrados no lado mais rugoso da amostra, onde observa-se a tendência de aumento na resistividade volumétrica com a diminuição da rugosidade, em decorrência da amostra ser hidrofóbica (Silicone) ou hidrofílica (EPDM).

Tabela 4.8 - Medidas de rugosidade (μm) para isoladores de EPDM

Isoladores de EPDM	Lado menos rugoso Rugosidade Mínima (μm)	Lado menos rugoso Rugosidade Máxima (μm)	Lado mais rugoso Rugosidade Mínima (μm)	Lado mais rugoso Rugosidade Máxima (μm)
1 (campo/96)	0,88	1,32	2,59	4,91
2 (após QUV)	0,53	0,79	0,51	0,73
3 (após 120°C)	0,44	0,94	0,40	0,82
4 (novo)	0,37	0,89	0,42	0,80
5 (após NS)	0,50	0,93	0,34	0,66
7 (após Água)	0,73	0,91	0,67	1,73

*Valores encontrados nas medições de rugosidade (μm) para os isoladores de EPDM nos dois lados, identificados como mais e menos rugoso

Comparando-se os resultados obtidos para os envelhecimentos, nota-se que todos os valores de rugosidade aumentam em relação ao isolador novo. Os isoladores submetidos ao envelhecimento térmico, QUV e ao ensaio de névoa salina mostram-se menos sensíveis ao aumento da rugosidade, enquanto que os isoladores submetidos ao envelhecimento em campo (por sete anos) e em água mostram um maior aumento da rugosidade superficial.

Quando os resultados são comparados com os resultados de dureza obtidos para as mantas de EPDM, observa-se uma tendência a menores rugosidades mínimas e máximas para o lado identificado como mais rugoso para os isoladores. Em contrapartida, para o lado identificado como menos rugoso, a tendência é a obtenção de valores mais elevados quando comparados com os resultados obtidos para as mantas.

As medidas de rugosidade para as mantas de EPDM e de silicone antes do envelhecimento estão mostradas nas tabelas 4.9 e 4.10, respectivamente o lado menos rugoso corresponde ao lado que ficou em contato com o molde durante a preparação da manta.

Tabela 4.9 - Medidas de rugosidade (μm) para mantas de EPDM, sem envelhecimento, nos lados identificados como mais e menos rugoso

Mantas de EPDM	Lado mais rugoso Rugosidade Mínima (μm)	Lado mais rugoso Rugosidade Máxima (μm)	Lado menos rugoso Rugosidade Mínima (μm)	Lado menos rugoso Rugosidade Máxima (μm)
1A	1,13	1,17	0,82	0,85
1B	1,01	1,07	0,89	0,93
2A	1,01	1,03	0,40	0,46
2B	0,94	1,05	0,44	0,49
3A	0,76	0,81	0,39	0,42
3B	0,91	0,96	0,49	0,52
4A	1,26	1,31	0,72	0,74
4B	1,48	1,50	0,79	0,85
5A	0,98	1,02	0,72	0,74
5B	1,89	1,92	0,68	0,69
6A	1,78	1,82	0,47	0,50
6B	0,76	0,83	1,33	1,38
7A	0,94	0,97	0,81	0,91
7B	1,68	1,74	0,72	0,75

Tabela 4.10 - Medidas de rugosidade (μm) para mantas de Silicone, sem envelhecimento, nos lados identificados como mais e menos rugoso

Mantas de Silicone	Lado mais rugoso Rugosidade Mínima (μm)	Lado mais rugoso Rugosidade Máxima (μm)	Lado menos rugoso Rugosidade Mínima (μm)	Lado menos rugoso Rugosidade Máxima (μm)
1A	0,75	0,77	0,54	0,64
1B	1,22	1,33	0,36	0,38
2A	1,06	1,09	0,33	0,37
2B	1,17	1,35	0,61	0,66
3A	0,84	0,89	0,47	0,52
3B	0,97	0,99	0,33	0,38
4A	1,07	1,08	0,56	0,58
4B	0,90	0,94	0,69	0,77
5A	1,47	1,55	0,86	0,88
5B	1,05	1,16	0,66	0,67
6A	1,11	1,13	0,96	1,01
6B	1,63	1,68	0,75	0,76
7A	1,02	1,03	0,58	0,59
7B	1,72	1,74	0,71	0,72

As medidas de rugosidade para as mantas de EDPM e Silicone após os envelhecimentos acelerados estão dispostas na tabelas 4.11 e 4.12, respectivamente, onde as variações negativas percentuais foram feitas em relação à medida inicial sem envelhecimento nos lados identificados como mais e menos rugoso.

Tabela 4.11 - Medidas de rugosidade (μm) para mantas de EPDM após os envelhecimentos acelerados ou artificiais

Mantas EPDM	Lado mais rugoso Rugosidade Mínima (μm)/- $\Delta\%$		Lado mais rugoso Rugosidade Máxima (μm) /- $\Delta\%$		Lado menos rugoso Rugosidade Mínima (μm) /- $\Delta\%$		Lado menos rugoso Rugosidade Máxima (μm) /- $\Delta\%$	
1A (100°C)	0,40	34	1,87	+60	0,22	55	0,52	39
2A (100°C)	0,35	34	0,73	41	0,20	50	0,44	4
2B (100°C)	0,31	32	0,74	30	0,24	45	0,53	8
3A (100°C)	0,20	75	0,53	35	0,40	2	0,81	93
3B (100°C)	0,21	77	0,44	54	0,24	51	0,86	65
1B (QUV)	0,27	26	0,64	40	0,51	32	0,68	27
4A (QUV)	0,40	68	0,93	29	0,72	0	1,49	+101
4B (QUV)	0,40	73	1,17	22	0,31	40	0,81	10
5A (QUV)	0,30	69	0,60	41	0,39	46	1,32	+78
6A (QUV)	0,36	80	0,73	60	0,30	36	0,71	42
5B (NS)	0,30	84	0,88	54	0,25	63	0,54	22
6B (NS)	0,24	68	0,68	18	0,44	67	0,71	49
7A (NS)	0,30	68	0,92	5	0,24	70	0,41	55
7B (NS)	0,48	71	0,87	50	0,22	69	0,44	41

Com relação aos dados da tabela 4.12, observam-se que as variações percentuais para a maioria dos corpos-de-prova em NS e QUV foram maiores que 65%.

Tabela 4.12 - Medidas de rugosidade (μm) para mantas de Silicone após os envelhecimentos acelerados

Mantas EPDM	Lado mais rugoso Rugosidade Mínima (μm)/- $\Delta\%$		Lado mais rugoso Rugosidade Máxima (μm) /- $\Delta\%$		Lado menos rugoso Rugosidade Mínima (μm) /- $\Delta\%$		Lado menos rugoso Rugosidade Máxima (μm) /- $\Delta\%$	
1A (QUV)	0,24	68	0,63	18	0,17	68	1,34	+109
1B ((QUV)	0,40	67	1,90	+43	0,17	53	0,54	+42
2A (QUV)	0,38	64	0,64	41	0,36	9	1,09	+194
2B (QUV)	0,20	83	0,75	44	0,53	13	1,61	+144
4B (QUV)	0,29	68	0,72	23	0,49	29	1,34	+74
3A (100°C)	0,57	32	1,35	+52	0,39	17	1,53	+242
3B (100°C)	0,51	47	1,25	+80	0,31	6	0,73	+154
4A (100°C)	0,19	82	0,80	26	0,47	16	1,25	+115
5A (100°C)	0,50	66	1,02	34	0,42	51	0,71	7
5B(100°C)	0,21	80	0,69	41	0,40	39	0,95	+42
6A (NS)	0,27	76	0,73	35	0,40	58	1,07	+5
6B (NS)	0,32	80	0,86	49	0,42	44	1,42	+87
7A (NS)	0,54	47	1,39	+35	0,36	38	0,95	+61
7B (NS)	0,27	84	0,67	61	0,72	1	1,16	+61

4.7 – Ensaios de Dureza

As incertezas apresentada referem-se a faixas de 95% de confiabilidade, onde $t=2,776$, sigma é o desvio padrão e n é o número de medidas (5, neste caso).

As medidas de dureza avaliam as propriedades mecânicas dos isoladores e mantas elastoméricas bem como o efeito dos diversos tipos de envelhecimento na perda dessa propriedade.

A tabela 4.13, a seguir, mostra resultados de variações em dureza Shore A obtidos para mantas de EPDM e silicone para os envelhecimentos acelerados com névoa salina, QUV e envelhecimento térmico a 100° C.

Tabela 4.13 – Resultados de Dureza Shore A para as Mantas Elastoméricas de EPDM e Silicone (5 medidas feitas para cada amostra de manta)

Mantas	EPDM Nova	EPDM Névoa Salina	EPDM QUV	EPDM Após 100°C
Dureza (Shore A)	73,6±0,6	77,0±0,2	77,4±0,6	77,6±0,6
Variação (%)	-	+4	+4	+5
Mantas	Silicone T=0	Silicone Névoa Salina	Silicone QUV	Silicone Após 100°C
Dureza (Shore A)		80,6±0,6	82,0±0,7	84,2±1,3
Variação (%)	-	+3	+5	+8

Os resultados de dureza Shore A obtidos para as mantas poliméricas após o envelhecimento mostram um ligeiro aumento dessa propriedade em relação ao material antes do envelhecimento. Neste caso, o envelhecimento térmico mostrou-se mais agressivo, para ambos os materiais. O aumento do parâmetro de dureza após o envelhecimento pode estar relacionado com a migração da carga inorgânica para a superfície e infere-se que o aumento da temperatura facilite a mobilidade da carga.

Os ensaios de dureza shore A para os isoladores de EPDM envelhecidos em campo estão mostrados na tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Dureza Shore A para isoladores de EPDM envelhecidos em campo

Isoladores	1(Campo)	2 (Após QUV)	3 (Após 120°C)	4 (Novo)	5 (Após névoa salina)	7 (Após água)
Dureza (Shore A)	49,1±1,1	51,0±1,0	51,6±1,1	50,2±0,8	49,4±0,6	49,8±0,5

A dureza para os isoladores apresenta valores menores do que os obtidos para as mantas e os resultados obtidos sugerem que a dureza não foi afetada pelos diversos tipos de envelhecimento.

4.8 - Ensaios de Tração

Os ensaios de tração foram obtidos na Máquina Universal de Ensaios MTS 810, para os isoladores. O ensaio de tração nos isoladores foi realizado até 80% da Resistência Máxima Suportável (RMS).

Para as análises das mantas foi utilizada a Máquina Universal de Ensaios Kratos, K2000MP. A velocidade utilizada para o ensaio foi de 53mm/min. As amostras de EPDM novas estão identificadas pelo símbolo t=0

Após o ensaio, foi feita análise visual dos corpos de prova e não foi detectada nenhuma alteração. As tabelas 4.15 e 4.16, mostram os resultados dos ensaios de tração nas mantas de EPDM e nas mantas de Silicone, respectivamente, os quais não sofreram alterações após os envelhecimentos.

Tabela 4.15 - Resultados dos Ensaios de Tração para Amostras de Mantas de EPDM antes e após envelhecimento acelerado

Amostras EPDM/envelhecimento artificial	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento Máximo (%)
EPDM(t=0)	6,5 ± 2,7	157,9±8,2
EPDM (NS)	6,6 ± 0,5	157,9±6,5
EPDM (Água)	7,1 ± 0,5	136,1±12,4
EPDM (100°C)	9,4 ± 0,7	150,1±6,7
EPDM (120°C)	7,6 ± 0,2	125,3±2,7
EPDM (QUV)	5,8 ± 0,5	96,2 ±5,6

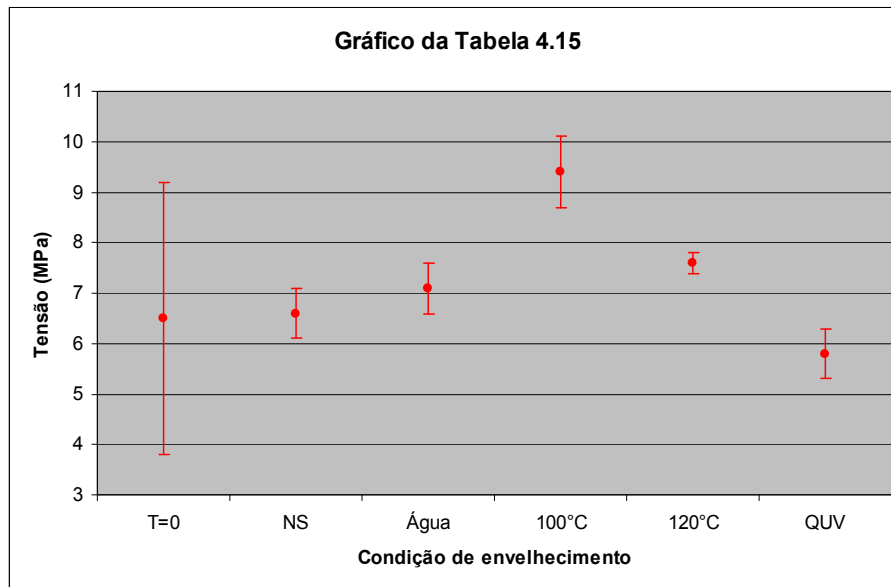


Figura 4.7 – Gráfico do Resultado da Tensão da Tabela 4.15

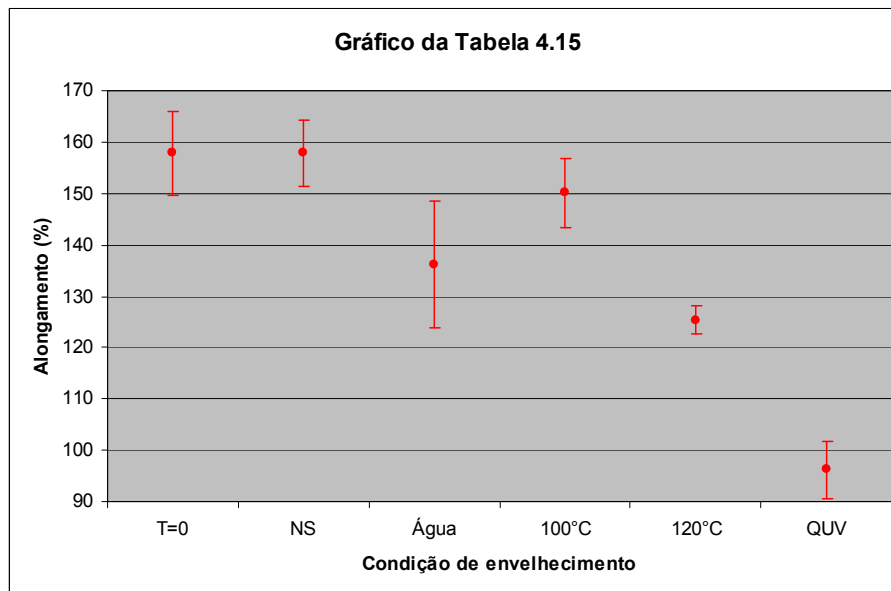


Figura 4.8 – Gráfico do Resultado do Alongamento da Tabela 4.15

Os gráficos (Figura 4.7 e 4.8) relatam que o material sem envelhecimento apresenta elevada dispersão nos valores de tensão de fratura. Após envelhecimento, a dispersão dos valores diminui. Entretanto, não foi observada diferença estatisticamente significativa com 95% de grau de confiabilidade entre o material sem envelhecimento e o envelhecido. Porém, existe diferenças estatisticamente significantes entre os valores de tensão de fratura após os diferentes tipos de envelhecimento. Comparando apenas o material envelhecido, após o envelhecimento a 100°C o material apresentou a maior tensão de fratura; após o envelhecimento em UV apresentou a menor.

Quanto ao alongamento, este apresenta um quadro mais claro: O material não envelhecido apresentou elevado alongamento na ruptura. O envelhecimento em névoa salina não afetou o alongamento. Já o envelhecimento a 100°C afetou reduziu ligeiramente o valor do alongamento. Reduções estatisticamente significantes, com 95% de confiabilidade, entretanto, foram observadas após envelhecimento em água, em 120°C e em UV. Interessante notar que o envelhecimento em UV teve o maior impacto na resistência mecânica, resultando no menor alongamento e tensão na fratura.

Os resultados de resistência à tração, com variações em até 20% e com alongamento máximo percentual de até 40%, podem ser considerados como aceitáveis ou seja, os produtos após estes envelhecimentos, mantendo as variações percentuais nesta faixa, podem ser aceitos como aplicáveis em campo, pois dentro desses níveis espera-se conseguir manter a funcionalidade e bom desempenho dos materiais. Essa observação também aplica-se para as mantas de EPDM, pois todas as variações em propriedades de tração estão dentro de resultados aceitáveis.

Tabela 4.16 - Resultados dos Ensaio de Tração para Amostras de Mantas de Silicone antes e após envelhecimento acelerado

Amostras Silicone/envelhecimento artificial	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento Máximo (%)
Silicone (t=0)	1,9 ± 0,1	215,8±37,9
Silicone (NS)	2,1 ± 0,1	179,9±11,8
Silicone (Água)	2,2 ± 0,2	168,0 ±17,7
Silicone (100°C)	2,7 ± 0,3	123,7±13,2
Silicone (120°C)	3,0 ± 0,1	84,8±2,3
Silicone (QUV)	2,3 ± 0,3	97,2±7,1

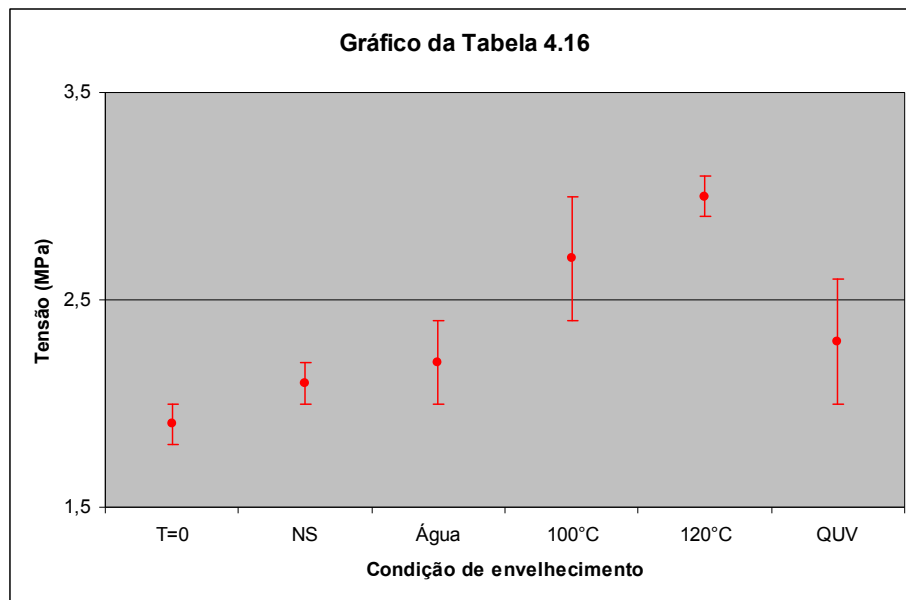


Figura 4.9 – Gráfico do Resultado da Tensão da Tabela 4.16

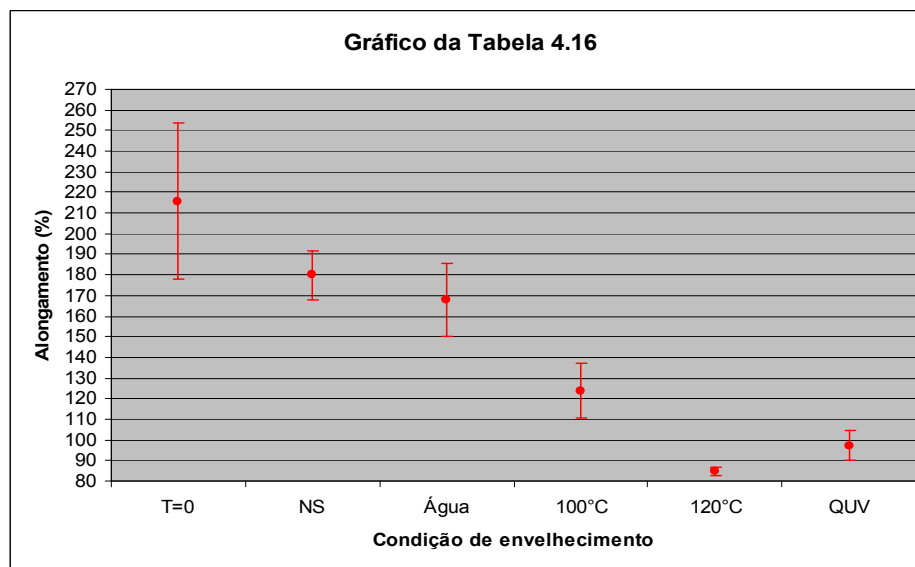


Figura 4.10 – Gráfico do Resultado do Alongamento da Tabela 4.16

Das Figuras 4.9 e 4.10 observa-se que, qualquer que seja o tipo de envelhecimento, o material envelhecido apresentou, com 95% de confiabilidade, tensão de fratura significativamente maior e alongamento na ruptura significativamente inferior ao material não envelhecido. A variação maior foi verificada após envelhecimento a 120°C. Vale notar

que, como no caso das mantas de EPDM, o envelhecimento em UV resultou em redução grande no alongamento na ruptura.

Da tabela 4.16 observa-se que, no caso das mantas de silicone, os resultados encontrados para o alongamento percentual máximo, após o envelhecimento por radiação QUV e após o de envelhecimento térmico a 120°C ultrapassam a faixa de variação de aceitável. Portanto, neste caso, há necessidade de um sistema de estabilização adicional para que os produtos possam ser aplicados em campo, sem perder suas propriedades mecânicas quando submetidos a altas temperaturas e a este tipo de radiação.

4.9 - Ensaios por TGA nos Isoladores

Através de análises termogravimétricas, podem-se determinar as faixas de temperatura em que a degradação do material se processa e também a perda de massa associada à mesma. A tabela 4.17 mostra as temperaturas de início de degradação (T_{id}) e a perda de massa percentual a 300 °C e a 400°C para as amostras dos isoladores.

Tabela 4.17 - TGA a 10°C/minuto das amostras retiradas dos isoladores : (0) novo; (1) de campo ;(3) após envelhecimento térmico; (4) novo; (5) após névoa salina; (7) após água

Amostras/Propriedades	T_{id} (°C) (aproximada)	Perda de massa a 400°C (%)	Perda de massa a 300°C (%)
0	225	24	24
1	225	23	23
3	240	23	23
4	225	25	25
5	225	23	23
7	225	23	23

T_{id}: temperatura de início de decomposição

As propriedades termogravimétricas não foram alteradas com os envelhecimentos das amostras. A maior T_{id} pode ser explicada pela maior percentagem de cristalinidade desta amostra em relação às demais, conforme mostra a tabela 4.17 a amostra 3 apresenta a maior entalpia de fusão.

4.10- Calorimetria Diferencial Exploratória de Varredura (DSC) nos Isoladores e Mantas

As análises de calorimetria diferencial exploratória foram realizadas utilizando-se um equipamento Calorímetro Diferencial, DSC 910 da TA Instruments.

Os resultados das análises calorimétricas para as amostras dos isoladores de EPDM estão apresentados na tabela 4.18, mostrada a seguir.

Tabela 4.18 - DSC a 10°C/minuto dos isoladores de EPDM: (0) novo; (1) de campo ; (3) após envelhecimento térmico; (4) novo; (5) após névoa salina; (7) após água

Amostras/ Propriedades	T fusão 1 (°C)	Entalpia de fusão 1 (J/g)	T2 fusão (°C)	Entalpia de fusão 2 (J/g)	Entalpia total (J/g)
0	250	60	360	342	402
1	260	63	354	307	370
3	nc	nc	354	554	554
4	nc	nc	353	521	521
5	248	54	355	373	426
7	251	82	353	349	431

Os envelhecimentos térmicos das mantas de EPDM ocasionaram os maiores graus de cristalinidade total encontrados.

Os valores encontrados para a entalpia de fusão apóiam a discussão de que a fase cristalina diminui gradativamente com a degradação. Dos resultados obtidos, pode-se estabelecer como requisitos para o acompanhamento da degradação do EPDM que a variação no grau de cristalinidade deve ser menor que 6% da variação na entalpia total e que a variação na fase cristalina deve ser inferior a 60% .

O envelhecimento em água proporcionou a maior entalpia de fusão 1 . Ambos os enunciados corroboram com os resultados encontrados para os isoladores de EPDM .

Comparando-se as amostras 0 e 4, ambas de isoladores novos, pode-se constatar que há diferença de cristalinidade de polímero entre elas, a primeira apresentando duas regiões diferentemente cristalinas e a número 4 com uma única. O mesmo ocorreu para a amostra 3, que também apresentou uma única temperatura de fusão, e, conseqüentemente, uma única entalpia de fusão. As entalpias de fusão cristalina, propriedade que é proporcional à percentagem de cristalinidade do polímero, para as amostras 3 e 4 foram superiores à

somatória das duas entalpias de fusão para as demais amostras, ou seja, o grau de cristalinidade é maior para as amostras 3 e 4 sendo, porém, esta fase cristalina de um único tipo de crescimento. O envelhecimento térmico ocasionou o maior grau de cristalinidade total encontrado para a amostra 3.

Dentre os resultados apresentados na Tabela 4.18 destaca-se a entalpia de fusão 1 da amostra envelhecida em água, amostra 7, superior às demais. A hidrólise pode ter favorecido este tipo de crescimento cristalino.

A amostra retirada de campo, amostra 1, possui o menor grau de cristalinidade e, conseqüentemente, o maior grau de região amorfa, o que também é característico de degradação do polímero.

Os resultados de análises térmicas por DSC das mantas elastoméricas de EPDM encontram-se na tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Resultados obtidos por DSC a 10°C/minuto para as mantas de EPDM

Amostras/ Propriedades	T fusão 1 (°C)	Entalpia de fusão 1 (J/g)	T2 fusão (°C)	Entalpia de fusão 2 (J/g)	Entalpia total (J/g)
EPDM t=0	257	52	351	360	412
EPDM após NS	252	44	352	370	414
EPDM após Água	253	54	357	357	411
EPDM após 100°C	262	39	357	394	433
EPDM após 120°C	268	20	350	418	438
EPDM após QUV	261	32	353	386	418

Os envelhecimentos térmicos das mantas de EPDM ocasionaram os maiores graus de cristalinidade total encontrados. Já o envelhecimento em água proporcionou a maior entalpia de fusão 1. Ambos os enunciados corroboram com os resultados encontrados para os isoladores de EPDM.

Os valores encontrados para a entalpia de fusão 1, decrescendo com os envelhecimentos térmicos e por QUV, também apóiam a discussão desta fase cristalina ir se perdendo com a degradação, chegando mesmo a desaparecer, caso do isolador após 120°C.

As variações em fases cristalinas e tipos de cristalinidade podem ser requisitos para acompanhamento de degradação do EPDM.

Tabela 4.20- Resultados obtidos por DSC a 10°C/minuto para as mantas de Silicone

Amostras/Propriedades	T fusão (°C)	Entalpia de fusão (J/g)	Variação em entalpias (%)
Silicone t=0	353	536	-
Silicone após NS	354	527	1,7
Silicone após Água	355	521	2,8
Silicone após 100°C	353	535	0,2
Silicone após 120°C	351	555	3,5
Silicone após QUV	355	558	4,1

Da tabela 4.20, observa-se que o envelhecimento térmico na temperatura de 120 °C e por radiação ultravioleta ocasionaram as maiores entalpias de fusão, sendo estas formas de envelhecimento considerados os mais agressivos para as mantas de silicone. Já o efeito da água foi menos percebido por estas mantas.

4.11- Análise Termo-Dinâmico-Mecânica (DMTA) para Isoladores de EPDM

Os ensaios de DMTA foram realizados em condições de temperatura em uma faixa situada entre -50 e 50°C. A análise foi realizada utilizando-se rampa de aquecimento de 2°C/min e Frequência de 1 Hz.

Os ensaios de Análise Termo-Dinâmico-Mecânica foram realizados em um Equipamento de DMTA- BD 019086 da marca Rheometric. Os resultados encontrados para os isoladores são apresentados na figura 4.11.

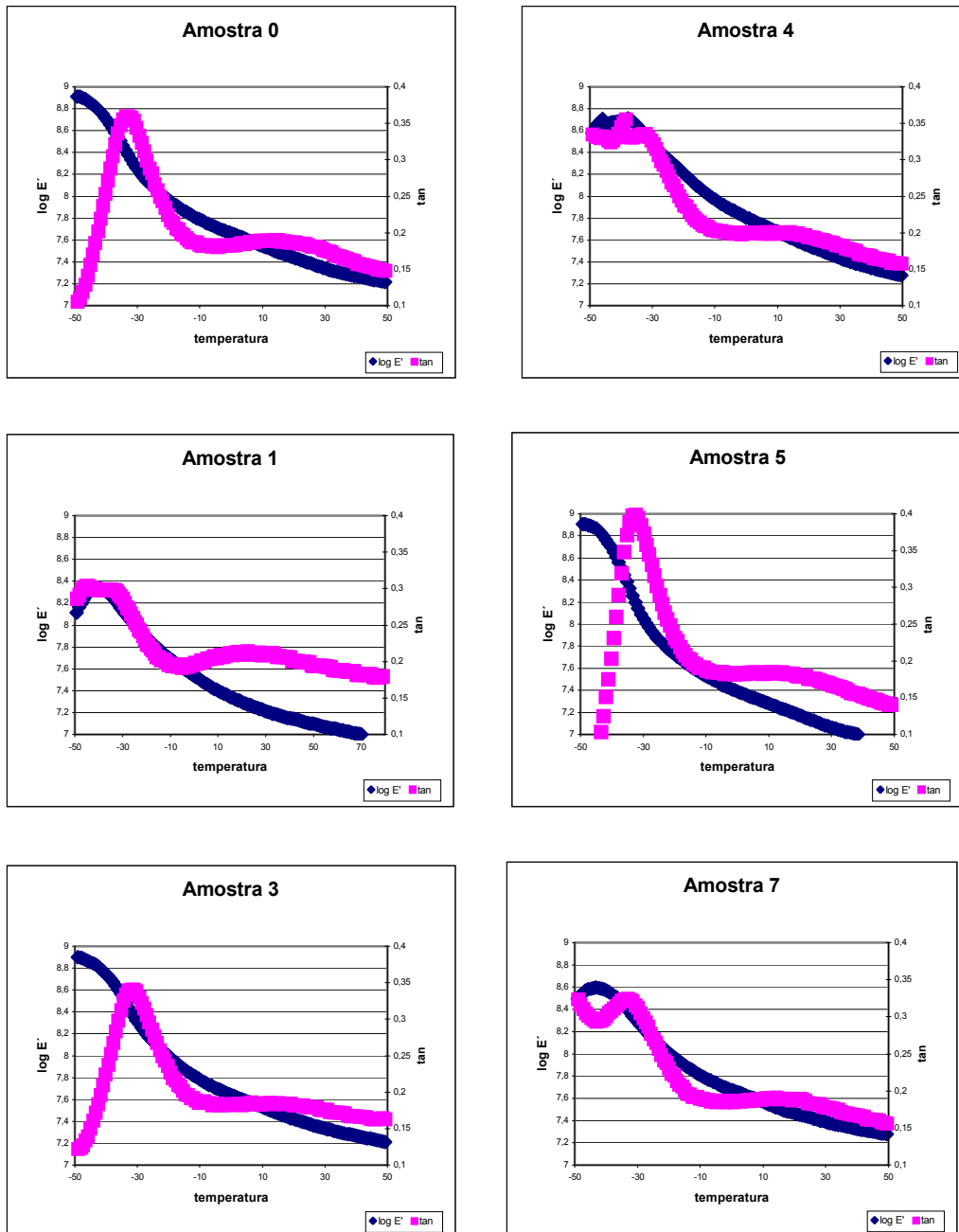


Figura 4.11- Termograma de DMTA de amostras de isoladores: (0) novo; de campo (1); (3) após envelhecimento térmico; (4) novo; (5) após névoa salina; (7) após água

Os resultados obtidos por DMTA para as mantas de EPDM são mostrados nas figuras 4.11. Sob o ponto de vista dessas propriedades térmicas, os isoladores novos 0 e 4 são diferentes. É perceptível dois grupos de comportamentos reológicos diferentes, quais sejam: Grupo das Amostras 0, 3 e 5 (novo, 120°C e NS) e grupo das Amostras 1, 4 e 7 (campo, novo e após água).

Os registros dos envelhecimentos em radiação QUV, envelhecimento térmico a 100°C e névoa salina foram similares aos obtidos para as amostras envelhecidas a 120° C, apresentados na figura 4.12c. Novamente, conforme pode ser observado, o comportamento da amostra de EPDM envelhecida em água por 3 meses (figura 4.12b) evidenciou o efeito mais agressivo da água nas variações das propriedades das mantas de EPDM. Nesse caso, o comportamento foi alterado significativamente, com aumento sensível da temperatura de transição vítrea, T_g , de -40°C foi para +10°C, corroborando com o que foi discutido acima a respeito das alterações de fases cristalinas. Assim, o efeito catalisador da água nas degradações do EPDM deve ser levado em conta nos requisitos. Um provável requisito para EPDM seria o estabelecimento da variação da T_g em , no máximo, 10 graus tomando-se como base que a T_g dos isoladores de EPDM situa-se em temperaturas próximas de -30°C, conforme determinado pela análise de DMTA.

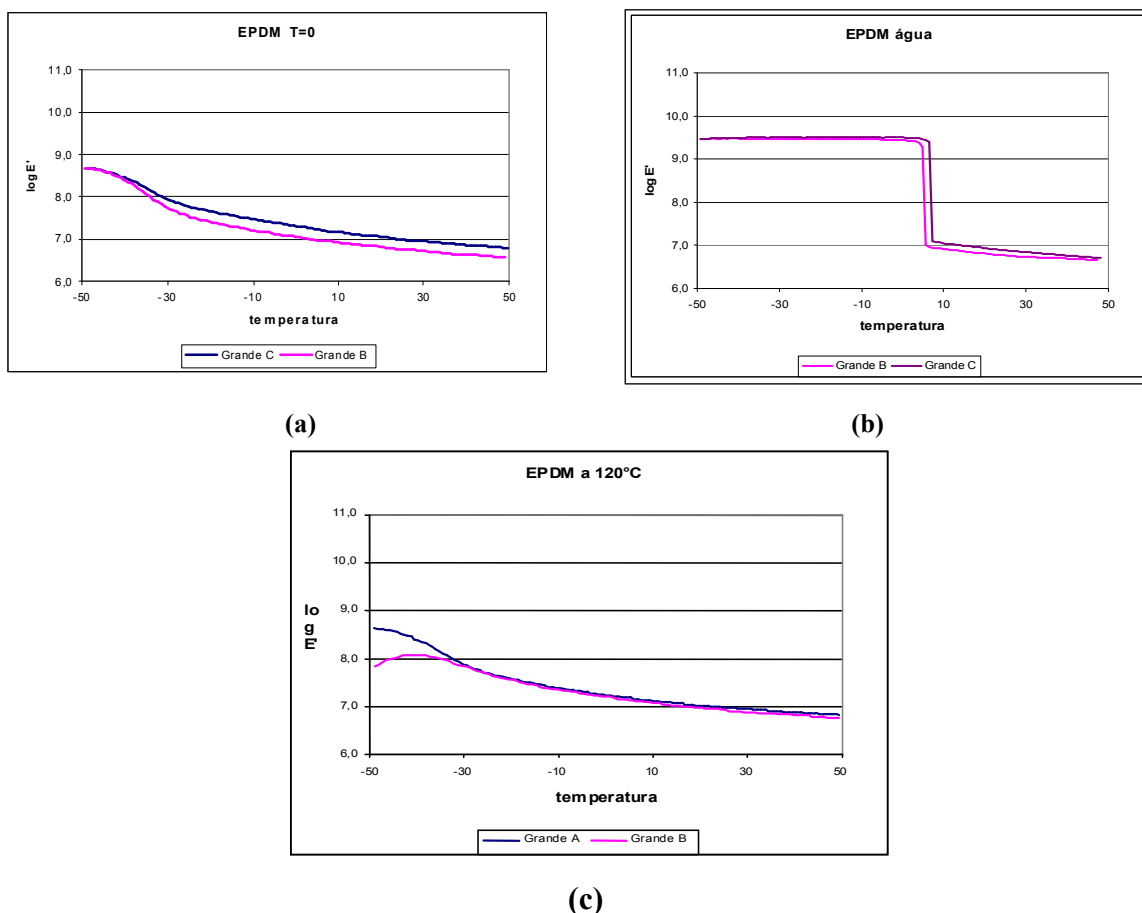


Figura 4.12 - Registro de DMTA de manta de EPDM, sem envelhecimento, envelhecida em água, por 3 meses e envelhecida a 120° C , por 3 meses

4.12 - Análise de Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

As análises de espectroscopia no infravermelho foram realizadas utilizando-se o Espectrofotômetro Infravermelho com Transformada de Fourier da marca Nicolet, modelo Magna 550, com Microscópio InspecIR acoplado.

As bandas de absorção em 1750 cm^{-1} obtidas nos espectrogramas de infravermelho caracterizam o EPDM.

Absorções de carbonilas, típicas de degradação de polímero, foram observadas com maior intensidade na superfície da amostra após 3 meses de submersão à água, o que pode ser atribuído à maior facilidade de degradação do componente dieno do EPDM.

A região de 3300 a 3500 cm^{-1} apresenta alterações significativas para as amostras 01 e 07. A banda a 1100 cm^{-1} , na superfície da amostra 1, de campo, é bem diferente das demais.

No caso da amostra 7, após água a análise da parte externa (superfície) mostrou absorções de carbonila em 1750 cm^{-1} , típicas de degradação do polímero.

A presença do gizamento (camada de pó branco, “chalking”) nas mantas, possivelmente pela migração da carga à superfície, ficou evidente nos espectrogramas de Silicone e de EPDM, após QUV. Isto está de acordo com a cor esbranquiçada encontrada nestas amostras.

O espectrograma da amostra de EPDM dos isoladores apresentou absorções bem alteradas, em função da degradação por ultravioleta, como a ausência de estiramentos CH na região de 2900 cm^{-1} (Figura 13).

Nas demais amostras não foram observadas diferenças significativas em relação à amostra não envelhecida (Figura 14)

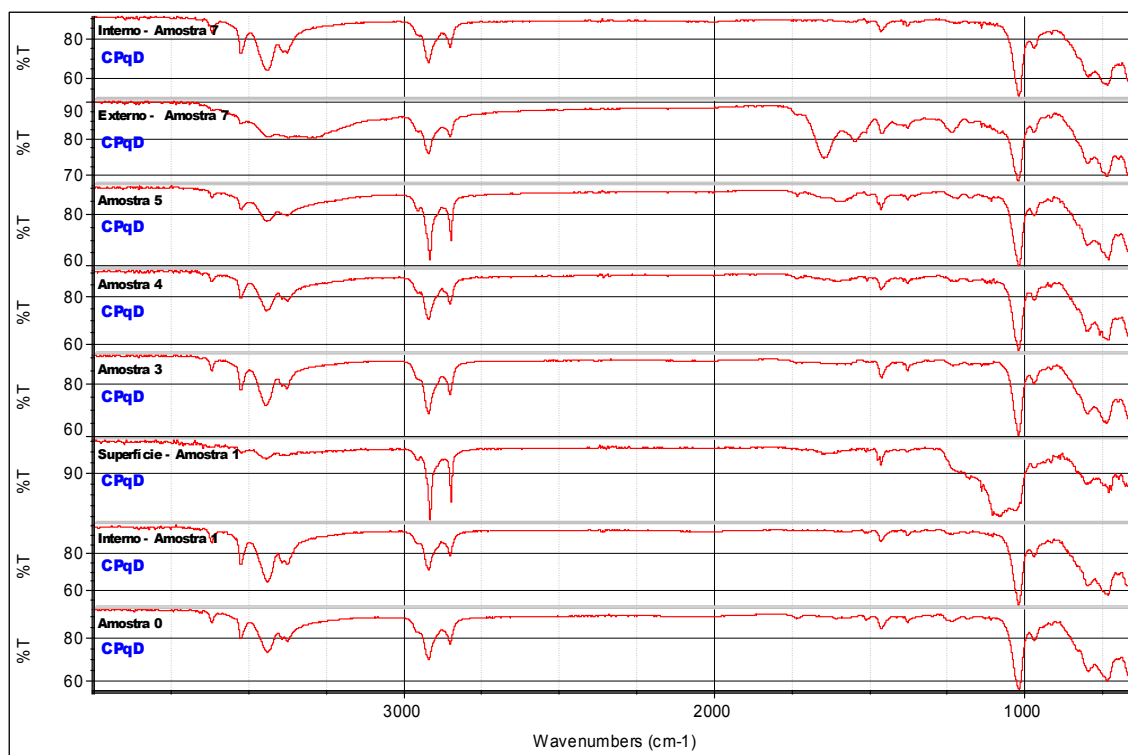


Figura 4.13 - Espectrogramas Infravermelho de amostras de isoladores de EPDM: (0) novo; (1) de campo (Linha Millenium Guarajuba, interior ao bairro); (3) após envelhecimento térmico; (4) novo; (5) após névoa salina; (7) após água

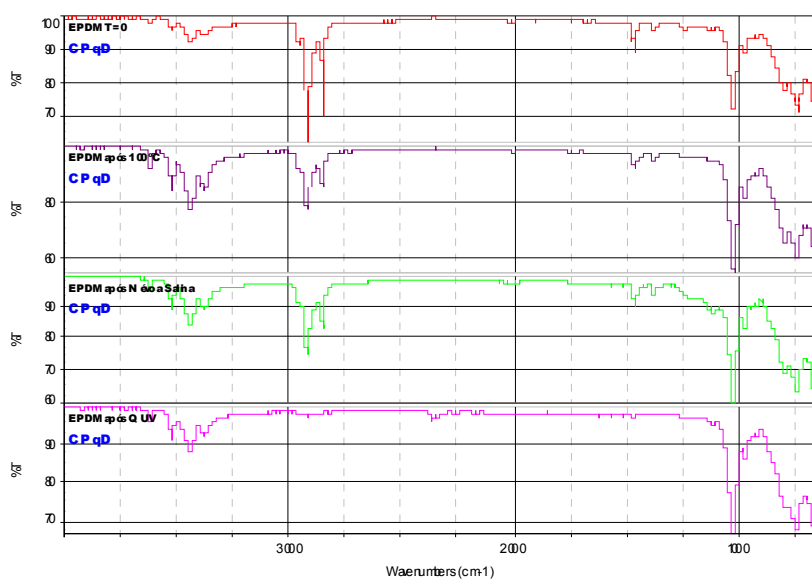


Figura 14 – Espectrogramas de infravermelho das mantas de EPDM: Novo (vermelho), Env. Térmico (vinho), após névoa salina(verde) e QUV (violeta).

4.13- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Micro-análise (MA) por Raios- X

As amostras de isoladores: (1) de campo; (2) após QUV; (3) após envelhecimento térmico; (4) novo; (5) após névoa salina; (7) após água, passaram por estudos de MEV com Micro-análise (MA). As mantas de Silicone e de EPDM também foram analisadas por esta técnica.

Os resultados encontrados na micro-análise (MA) referem-se às cargas inorgânicas presentes nas massas poliméricas. Os resultados encontram-se a seguir:

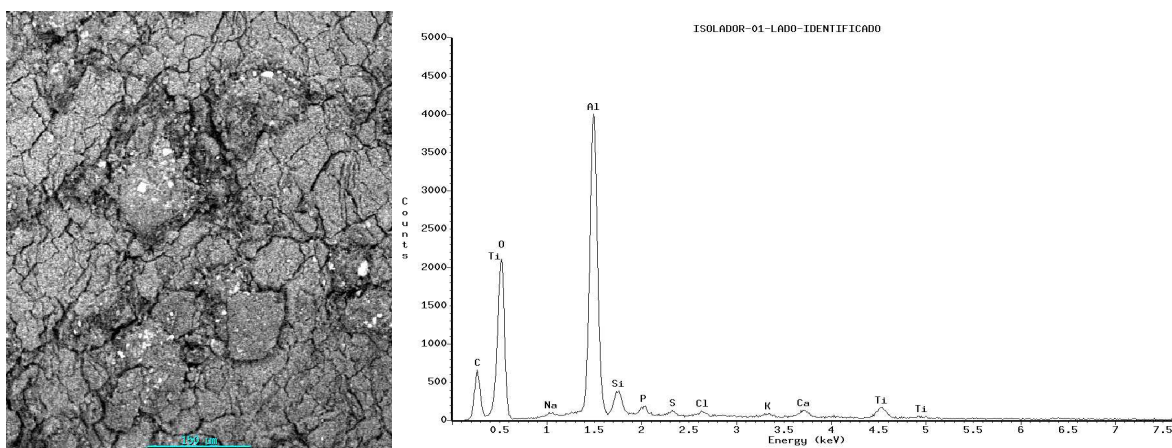


Figura 4.15 - MEV com MA na superfície do isolador 1, com aumento de 200 vezes, apresentando fissuras

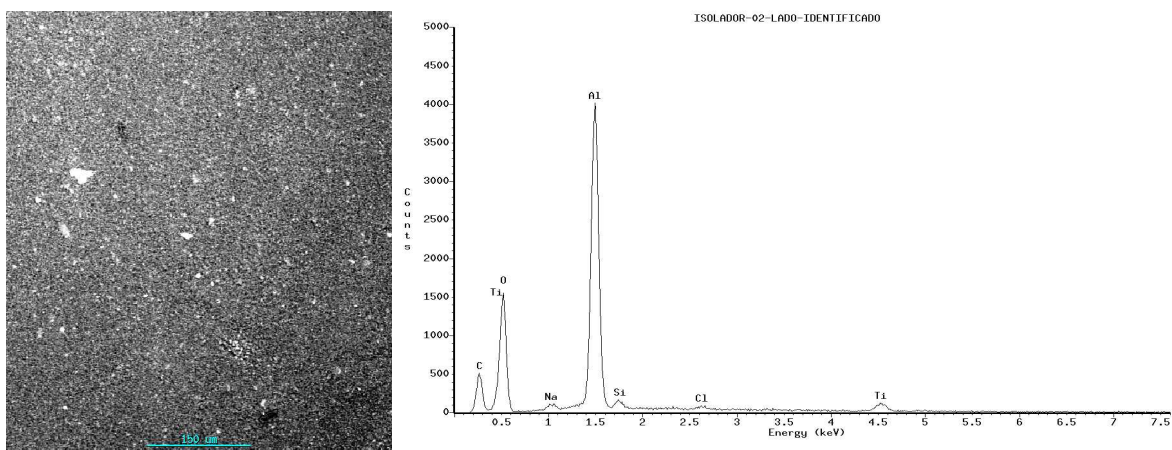


Figura 4.16 - MEV com MA na superfície do isolador 2, com aumento de 200 vezes

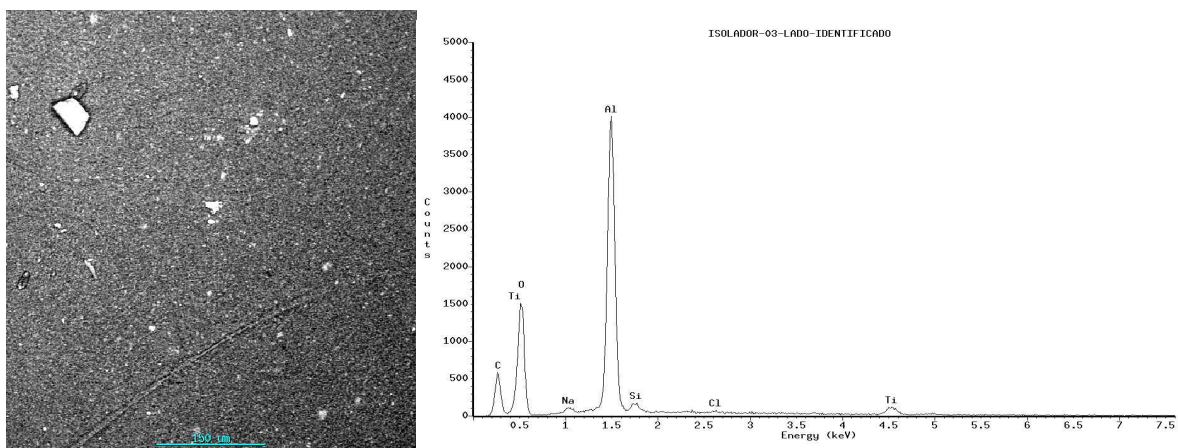


Figura 4.17 - MEV com MA na superfície do isolador 3, com aumento de 200 vezes

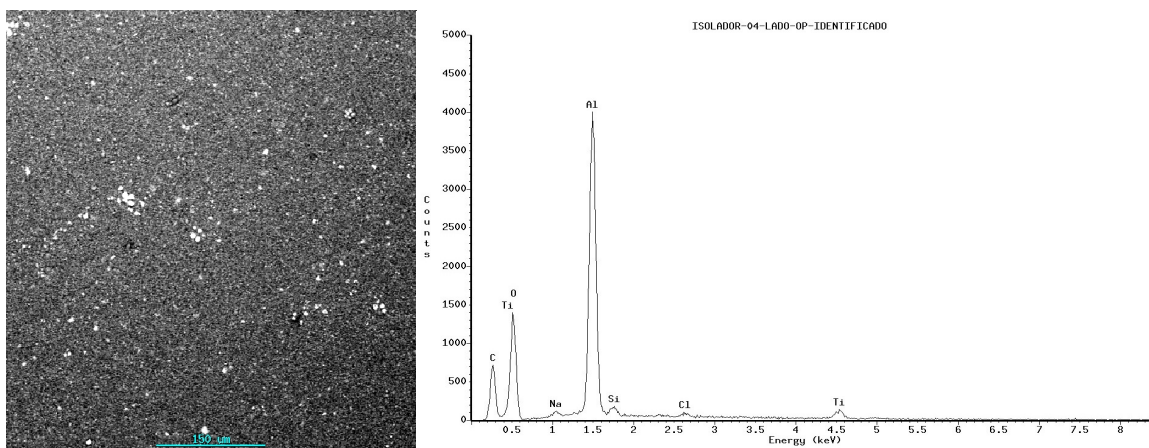


Figura 4.18 - MEV com MA na superfície do isolador 4, com aumento de 200 vezes

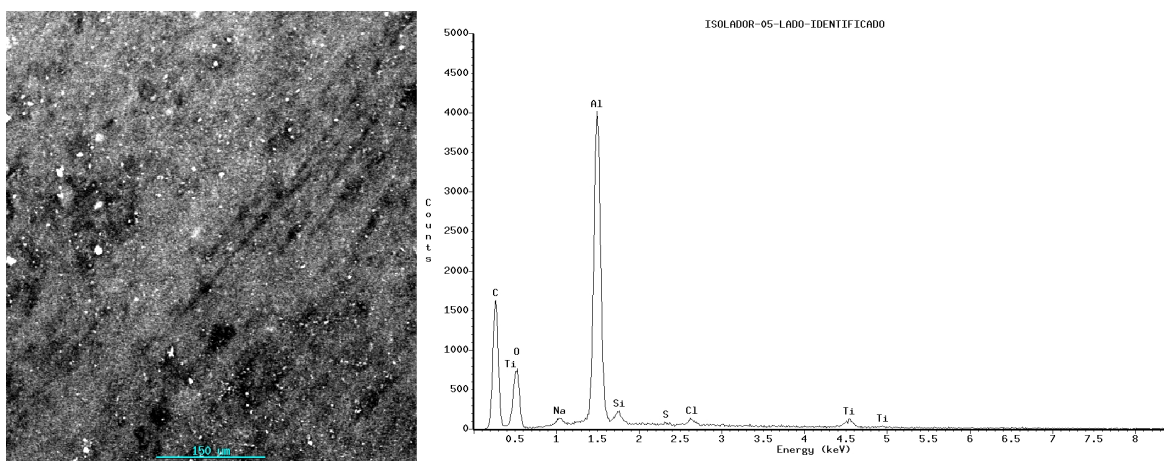


Figura 4.19 - MEV com MA na superfície do isolador 5, com aumento de 200 vezes, com microfissuras

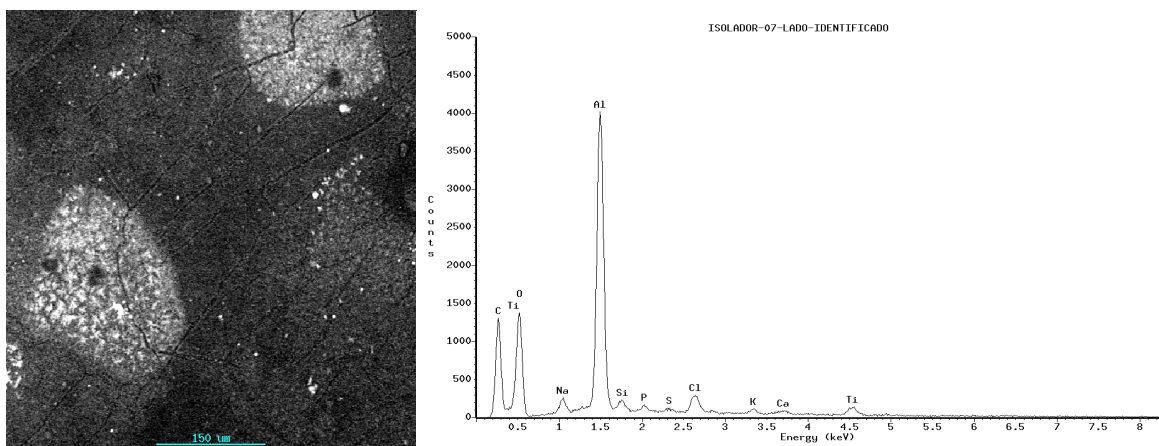


Figura 4.20- MEV com MA na superfície do isolador 7, com aumento de 200 vezes, com regiões de diferenciação cristalina e microfissuras

As cargas dos isoladores são à base de Al, Si e Ti, conforme mostrados os espectrogramas das micro-análises. Alumina trihidratada é usada como agente anti-trilhamento; talco (ou sílica) é usado como carga inorgânica.

No caso de todos os isoladores, são visíveis aglomerados de carga não homogeneamente dispersa na massa polimérica, com ênfase aos isoladores 3 (envelhecimento térmico) e 7 (após água). O isolador envelhecido em laboratório, em água, apresenta também regiões de diferenciação cristalina, com nucleação pela carga inorgânica, e formação de estrias e micro fissuras (vide Figuras 4.17 e 4.22).

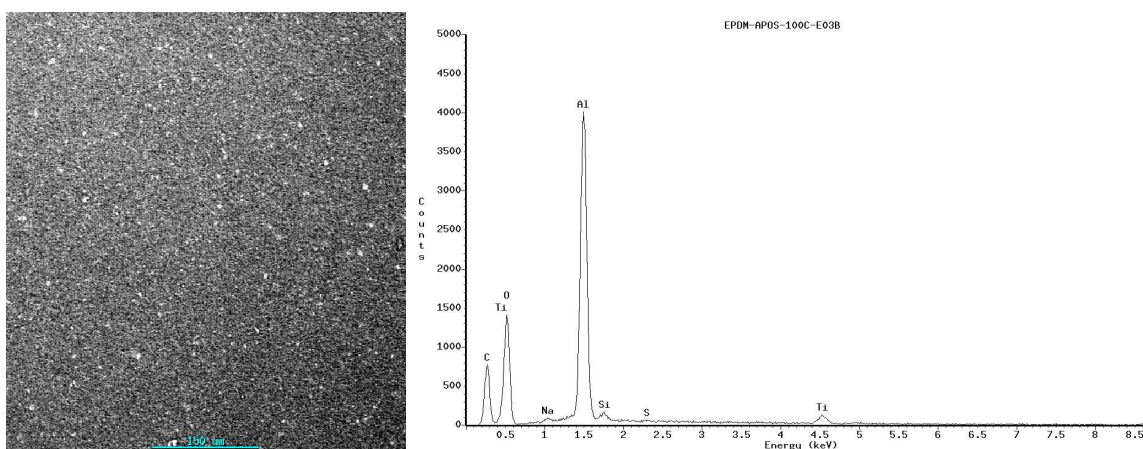


Figura 4.21 - MEV com MA na superfície da manta de EPDM após envelhecimento térmico a 100°C, com aumento de 200 vezes

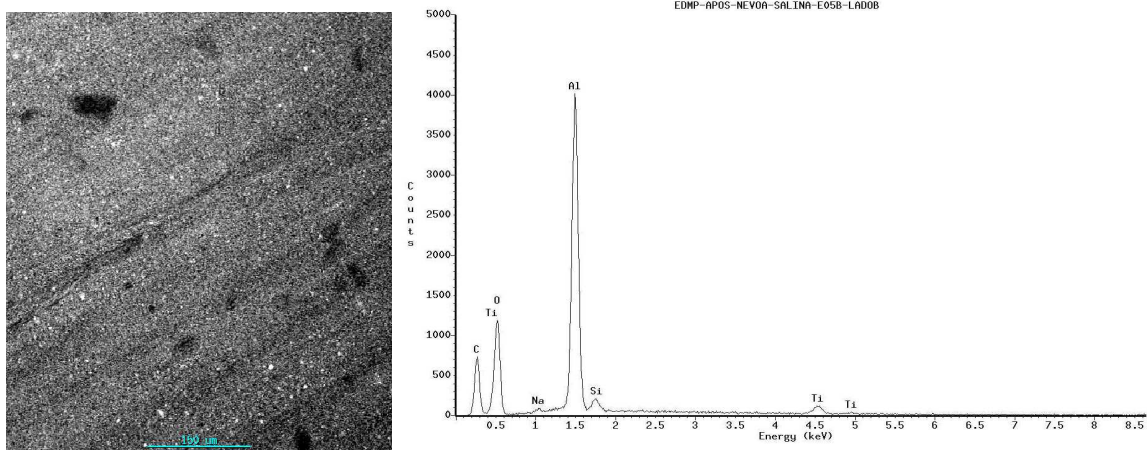


Figura 4.22 - MEV com MA na superfície da manta de EPDM após envelhecimento em névoa salina, com aumento de 200 vezes

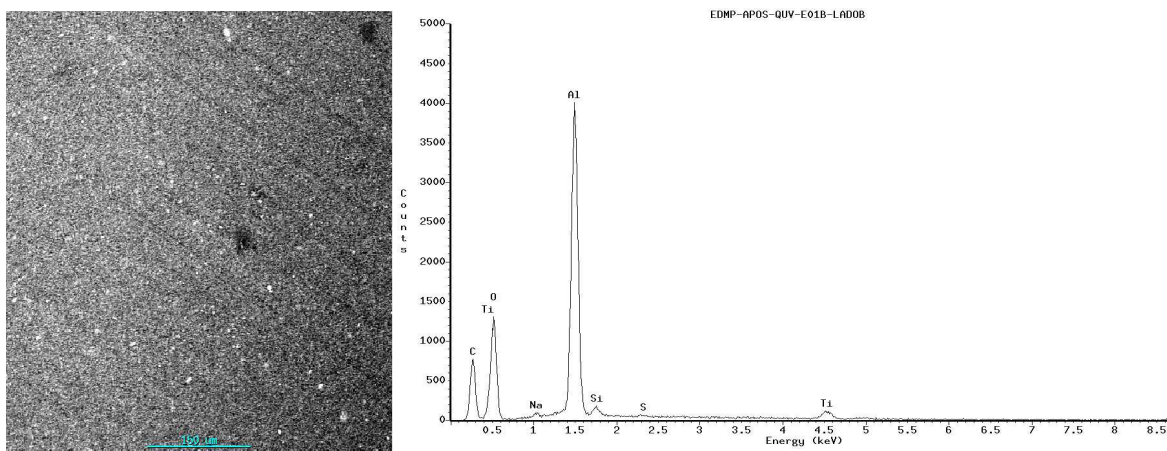


Figura 4.23- MEV com MA na superfície da manta de EPDM após envelhecimento em QUV, com aumento de 200 vezes

As mantas de EPDM mostram boa dispersão de carga e crescimento cristalino homogêneo. As cargas são compostas de Al, Si e Ti, na maioria dos elementos, entre outros minoritários. Alguns aglomerados de negro de fumo ou outro pigmento escuro inorgânico podem ser observados nas Figuras 4.22 e 4.23

As mantas de silicone, com cargas de Al e Si em maiores teores, apresentam regiões com não adequada dispersão destas, bem como aglomerados de negro de fumo ou outro pigmento inorgânico escuro, conforme figura a seguir.

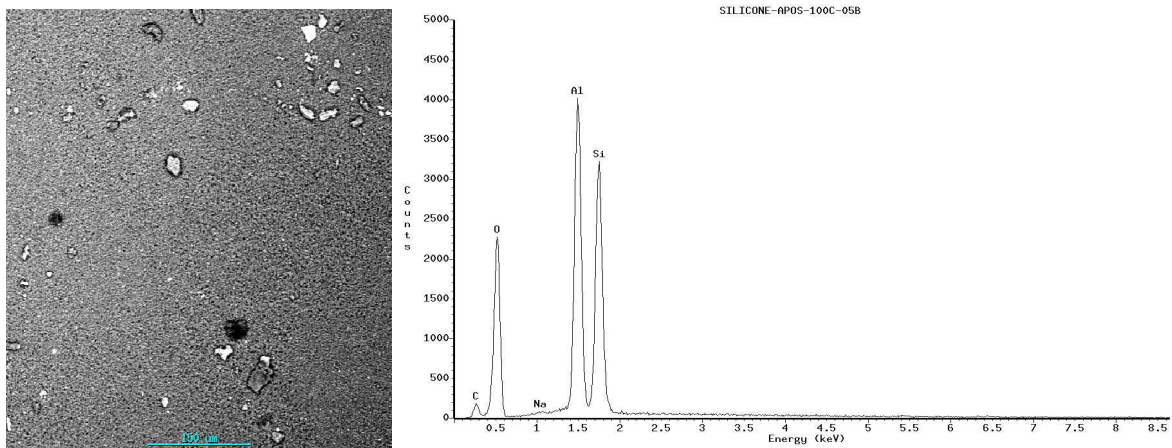


Figura 4.24 - MEV com MA na superfície da manta de Silicone após envelhecimento térmico a 100°C, com aumento de 200 vezes

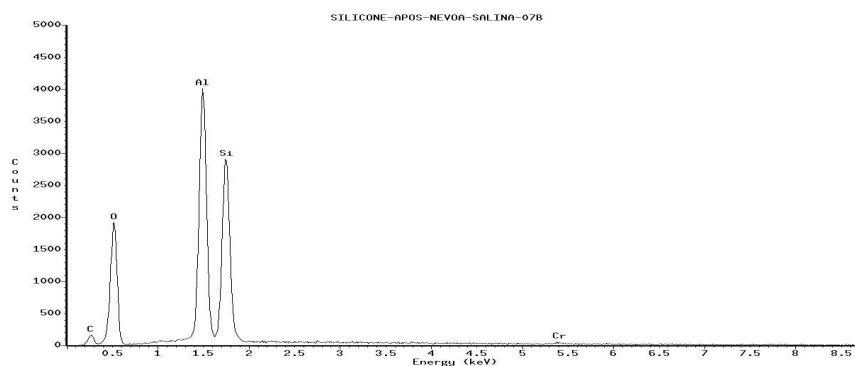


Figura 4.25 -MA na superfície da manta de Silicone após envelhecimento em névoa salina.

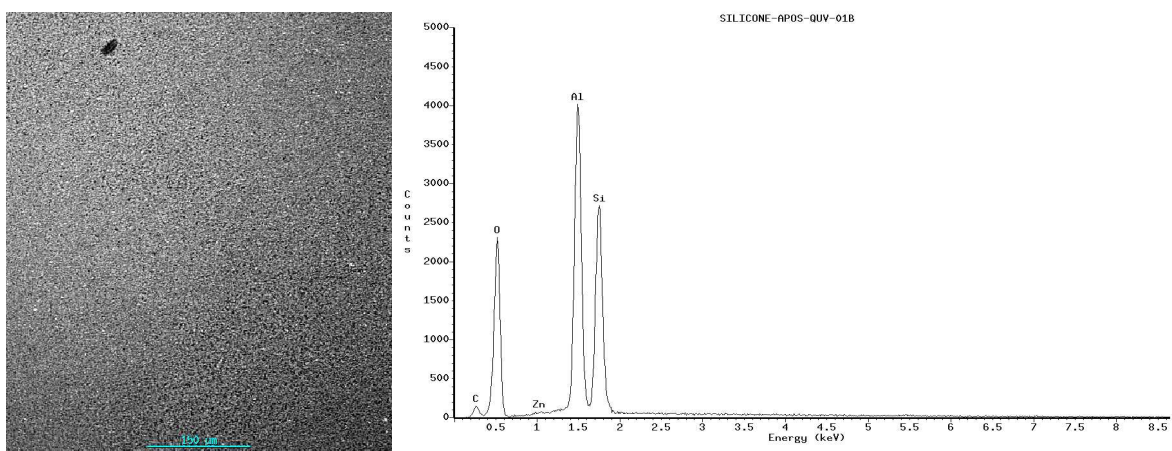


Figura 4.26 -MEV com MA na superfície da manta de Silicone após envelhecimento em QUV, com aumento de 200 vezes

De um modo geral, há boa dispersão e homogeneização das cargas nas massas poliméricas das mantas preparadas e dos isoladores analisados.

4.14- Ensaios elétricos

Os isoladores novos e os de campo, ensaiados em alta tensão, apresentaram bom desempenho no ensaio sob névoa poluída e sob névoa limpa. Os isoladores usados, com poluição incrustada na sua superfície, apresentaram valores elevados de corrente de fuga no ensaio com névoa salina, o que não foi observado no isolador novo. Quanto ao ensaio de radiointerferência, pode-se observar o comportamento exemplar dos isoladores quando secos, mas basta a deposição de gotas, decorrentes de uma leve garoa na sua superfície para que os resultados de radiointerferência atinjam valores elevados.

Capítulo 5 - Conclusões e requisitos de desempenho

O efeito da água e da salinidade, sob forma de chuva, aspersão ou submersão total, afetam diferentemente o desempenho funcional dos isoladores; a água também demonstrou ser um fator crítico no envelhecimento das mantas.

Os isoladores de EPDM são susceptíveis à degradação, nas condições de ensaios estudadas bem como as mantas de EPDM e de Silicone, que foram preparadas nas condições de processamento das aletas dos isolantes. Dentre os agentes de degradação estudados separadamente, a água mostrou-se a mais crítica para as variações nas propriedades elétricas, físico-químicas, mecânicas, térmicas e reológicas dos polímeros. A temperatura de 120°C e a radiação ultravioleta foram os fatores mais agressivos após a água.

As propriedades de superfície, rugosidade e resistividade superficial e volumétrica, são afetadas pelos envelhecimentos. As variações percentuais de rugosidade para os corpos-de-prova em névoa salina (NS) e radiação ultravioleta (QUV) foram maiores que 65%, para os materiais de EPDM. No caso dos materiais de silicone, as variações percentuais de rugosidade para os corpos-de-prova em QUV foram maiores que 65%; o mesmo ocorreu para a maioria em NS e a 100°C.

Observa-se tendência a menores diferenças entre rugosidades mínimas e máximas, para o lado identificado como mais rugoso, mais para os isoladores do que para as mantas de EPDM. Enquanto que, para o lado identificado como menos rugoso, a tendência é para diferenças maiores em comparação com as mantas (efeito diferenciado do molde). As amostras 1 e 7 apresentaram valores bem maiores, ou seja, o envelhecimento em campo e o envelhecimento em água foram mais agressivos que os demais, causando grande diferença entre a rugosidade mínima e a máxima.

Correlacionando-se os comportamentos observados para as propriedades de superfície, rugosidade e resistividade pode-se observar que, com os envelhecimentos, há tendência de diminuição da rugosidade e de aumento na resistividade superficial.

A resistividade superficial do silicone é bem menor que a do EPDM, para as amostras estudadas.

O envelhecimento a 100°C foi o mais agressivo para as mantas de Silicone do que para as de EPDM, o que é contrário ao esperado.

As mantas de EPDM apresentaram valores na faixa de 15.000 a $> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ para a resistividade superficial. O valor encontrado para o isolador novo, amostra 4, é compatível com esta faixa de valores. Já os isoladores envelhecidos em campo, ou em laboratório, apresentaram valores muito próximos de zero para a resistividade superficial, para as amostras em QUV e em água. Esse resultado foi bem diferente do encontrado para as mantas de EPDM sob envelhecimentos, que tiveram estes valores bem aumentados, com exceção de duas amostras sob névoa salina.

Os envelhecimentos artificiais por três meses em QUV, água e 120°C foram mais agressivos para os isoladores que o envelhecimento natural em campo, por 7 anos, em relação à resistividade superficial.

O envelhecimento em água também foi o mais agressivo, para a variação em rugosidade mínima, juntamente com o envelhecimento em campo.

Os resultados de variações em resistência à tração até 20% e de alongamento máximo percentual até 40 % podem ser considerados como aceitáveis. Se as amostras, após estes envelhecimentos diversos, mantiverem as variações percentuais nesta faixa, seus produtos podem ser aceitos para utilização em campo. No caso das mantas de EPDM isto é aplicável, ou seja, todas as variações em propriedades de tração estão dentro de resultados aceitáveis. Entretanto, para o caso das mantas de silicone, o mesmo não ocorreu para as variações após QUV e 120°C; ou seja, há necessidade de um sistema de estabilização adicional para que os produtos possam ser aplicados em campo sem perder suas propriedades mecânicas, sob altas temperaturas e radiação ultravioleta.

A seguir, são listados alguns **Requisitos de Desempenho** sugeridos para especificações de isoladores poliméricos:

1 - Os valores de **rugosidade superficial** para os isoladores de EPDM, na aceitação de compra, devem estar compreendidos nas seguintes faixas:

EPDM: 0,40 a 2,0 μm ;

Silicone: 0,3 a 1,7 μm .

2- As variações máximas permitidas para a propriedade de **rugosidade** da superfície, após 3 meses de envelhecimentos acelerados (água, ultravioleta, temperatura de 120°C, ou

névoa salina), podem ser de, **no máximo, 65% para os** isoladores de **EPDM ou Silicone**; ou mantas elastoméricas, preparadas da mesma forma que os isoladores. Isso enfatiza a necessidade de um molde adequado.

3- A variação permissível em **dureza**, após 3 meses de envelhecimento térmico a 120 °C, é de, **no máximo, 10 %**, nos isoladores de **EPDM ou Silicone** e Mantas poliméricas.

4- Variações **em resistência à tração até 20%** e de **alongamento máximo percentual até 40 %**, com velocidade de ensaio de **53mm/min**, podem ser aceitáveis, após 3 meses de envelhecimentos acelerados (água, ultravioleta, temperatura de 120°C, ou névoa salina), para os isoladores de **EPDM ou Silicone**, ou mantas elastoméricas preparadas da mesma forma que os isoladores.

5- Após 3 meses de envelhecimento térmico, a 120°C, as variações em fases cristalinas, acompanhadas pela variação na entalpia pelo DSC dinâmico, poderão ser de **no máximo de 6% da entalpia total** e de, **no máximo 60% da entalpia da fase cristalina 1**, correspondente a de menor temperatura de fusão, para **EPDM**.

6- Após 3 meses de envelhecimento em água, o **EPDM** pode ter variação na temperatura de transição vítrea, **Tg, obtida por DMTA de, no máximo, 10 °C**.

7- **Requisito geral:** Os polímeros devem conter sistema de termo e foto estabilização

Anexo A



Figura A1: Isoladores na linha Areembepe-Guarajuba; uma das fases com isolador de vidro e as outras duas com poliméricos.



Figura A2: Procedimentos de manutenção na linha Areembepe-Guarajuba



Figura A3: Procedimentos de manutenção na linha Areembepe-Guarajuba



Figura A4: Trabalho de retirada e instalação de isoladores da equipe de linha viva



Figura A5: Pólo de Camaçari

Anexo B

Tabela B1 Características da Borracha de EPDM – (Fonte Fornecedor)

Etileno Propileno (E.P.D.M.)		
Propriedades Mecânicas	Resistência à abrasão, absorção de água, recuperação a quente e a frio,	Excelente
	Deformação por compressão, adesão à tecidos.	Boa
	Resistência ao rasgamento, recuperação a frio, adesão aos metais	Razoável
Propriedades Químicas	Resistência aos Solventes	
	Hidrocarbonetos alifáticos	Fraca
	Hidrocarbonetos aromáticos	Fraca
	oxigenados (cetonas)	Excelente
	Resistência a Ácidos Concentrados	Boa
	Resistência a Ácidos diluídos	Excelente
	Inchamento em lubrificantes, petróleo e gasolina	Fraca
Propriedades Físicas	Isolamento Elétrico	Excepcional
	Temperaturas baixas, envelhecimento térmico, oxidação	Excelente
	Envelhecimento por luz solar, Resistência ao Ozônio	Excepcional
	Dureza em Shore A	30-90
	Peso específico (densidade) g/cm ³	0,86

Tabela B.2 Características da Borracha de Silicone (Fonte – Fornecedor)

Propriedades	Silicone (SI)	
Mecânicas	Absorção de água, Adesão à tecidos e metais, recuperação a quente e a frio	Excelente
	Deformação por compressão	Razoável
	Resistência ao rasgamento e abrasão	Fraca
Químicas	Resistência aos Solventes	
	Hidrocarbonetos alifáticos, Hidrocarbonetos aromáticos	Fraca
	oxigenados (cetonas)	Razoável
	Resistência a Ácidos Concentrados	Razoável
	Resistência a Ácidos diluídos	Excelente
	Inchamento em lubrificantes, petróleo e gasolina	Boa
Físicas	Isolamento Elétrico	Boa
	Temperaturas baixas	Boa
	Envelhecimento térmico	muito Boa
	Envelhecimento térmico, T. baixas	Excelente
	Resistência ao Ozônio, oxidação, envelhecimento por luz solar	Excelente
	Dureza em Shore A	40-85
	Peso específico (densidade) g/cm ³	1,14 - 2,05

Anexo C

Tabela C1: Isoladores retirados de campo em 2002

Isolador/ Identificação das amostras	Local	Aspecto
1	distante da orla	<ul style="list-style-type: none"> • corrosão na interface e na ponta metálica • interface com visível vazio • pontos escuros (sujeira) e escorrendo da corrosão metálica para as aletas • regiões brancas nas aletas.
2	próximo ao Mar (400m);	<ul style="list-style-type: none"> • corrosão na parte metálica, presença de fungos, pontos pretos (pontos de injeção) • corrosão branca e vermelha, aletas pretas no interior e brancas nas superfícies • regiões pretas com depósitos brancos
3 (pior caso da retirada de campo)	próximo ao Mar (400m)	<ul style="list-style-type: none"> • menos fungos, mas totalmente branco nas aletas • metal muito corroído em profundidade mas em menor extensão que o 2 • na extremidade com suporte, somente pontos brancos • pontos nos centros da borracha, interior às aletas, com região com furo começando próximo ao bastão quase desprotegido.
6	Camaçari	<ul style="list-style-type: none"> • pontos verdes (limos) e com tintas vermelhas • pontos cinza escuro no meio (corrente de fuga) • ausência de corrosão vermelha ou branca
7	Retirado de estoque mostruário da COELBA	<ul style="list-style-type: none"> • corrosão leve vermelha na extremidade sem suporte. Aletas com regiões escuras (bem distribuída de um lado) e bordas brancas • regiões brancas (gizamento) • outro lado das aletas, região esbranquiçada e com pontos pretos grandes

Os isoladores abaixo identificados, 69 kV e 120 kN, com diâmetros de aletas maiores, ou seja, mais largos, foram retirados de campo e entregues em março de 2003, e utilizados em ensaios de alta tensão:

Tabela C2: Isoladores retirados de campo em março 2003

Isolador	Local	Identificação/ Data fabricação	Aspecto
11	Alagoinha Sertão	1994 Com uma saia cortada	<ul style="list-style-type: none"> • com arco de potência • depósitos claro e escuro • corrosão na parte metálica
12	Sertão Umidade	1992	<ul style="list-style-type: none"> • arco de potência • depósitos claro e escuro • corrosão na parte metálica
13	Juazeiro, Norte, Seco	1998 Isolador fino, como 80 kN, embora seja 120 kN	<ul style="list-style-type: none"> • arco de potência • depósito escuro
14	Sertão, Umidade	1993	<ul style="list-style-type: none"> • depósito escuro
15	Guarajuba, Praia	x	<ul style="list-style-type: none"> • depósito branco (gizamento)
16	Alagoinha	1994	<ul style="list-style-type: none"> • arco de potência • depósito escuro
17	Sertão, Umidade	1994	<ul style="list-style-type: none"> • depósito escuro
18	Sertão, Umidade	1996 Isolador fino, como 80 kN, embora seja 120 kN	<ul style="list-style-type: none"> • arco de potência; • depósito claro; • corrosão na parte metálica.

Referências Bibliográficas

- [1] Schneider, H. M.; Guidi, W. W.; Burnham, J. T.; Gorur, R. S.; Hall, J. F; Accelerated aging and “flashover” tests on 138 kV nonceramic line post insulators; IEEE Transactions on Power Delivery v 8 n 1, 1993, p 325-336
- [2] Hall, James F., “History and Bibliography of Polymeric insulators for outdoor applications”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, nº 1, 1993
- [3] Meloni, A. E. M.; Bento, A. L. S.; Moraes, A. C. R. Análise técnico-econômico da utilização de isoladores compostos, de porcelana ou de vidro em linhas de transmissão de energia elétrica. XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, 2001
- [4] Hackam, R.; Outdoor high voltage polymeric insulators; Conference Title: Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials; 30th Symposium on Electrical Insulating Materials (IEEE Cat. No.98TH8286),p.1-16, 1998.
- [5] Hackam, R.; Outdoor HV composite polymeric insulators; Journal: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, no.5, p.557-85;1999.
- [6] Gela, George; Mitchell, David; Assessing the electrical and mechanical integrity of composite insulators prior to live working; Conference Title: 2000 IEEE ESMO -2000 IEEE 9th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance Proceedings (ESMO 2000); Source: Proceedings of the IEEE International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance, ESMO 2000, p 339-343; 2000.
- [7] Garcia, W. S.; Bade, S. A.; Oliveira, L. A.; Paiva, O. L. S.; Caperggiani, G. “ Avaliação de isoladores poliméricos submetidos a ensaio de envelhecimento acelerado”, Grupo III, GLT , XIV SNPTEE, 1997.
- [8] Spellman, C.A.; Young, H.M.; Haddad, A.; Rowlands, A.R.; Waters, R.T.; Survey of polymeric insulator ageing factors; Conference Title: Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering (Conf. Publ. No.467) Part vol.4, p.160-3 vol.4, 1999.
- [9] Gonzalez, E.G.C.; Sens, M.A.; Visconte, L.Y.; Nunes, R.C.R. “ Propriedades dielétricas de composições de silicone para uso em isoladores de Linhas de Transmissão”, Grupo III Linhas de Transmissão, GLT 009, XVI SNPTEE, 2001.
- [10] Vlastos, A.E.; Influence of material and electric stress on the performance of polymeric insulators; Conference Title: Proceedings of the 4th International Conference on

Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.94CH3311-8); Part vol.2, p.542-5 vol.2, 1994.

[11] Fukuda, S. V.; Hoffmann, J. V. Investigação do comportamento a longo termo de isoladores poliméricos tipo “line post”, submetidos a solicitações eletro-mecânicas. XVI SNPTEE , Campinas, 2001

[12] Moreno V M; Gorur R; AC and DC performance of polymeric housing materials for HV outdoor insulators; IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 1996, 6 (3) 342-350.

[13] Montesinos J; Gorur R S; Zimmer L; Hubele N F; Statistical models for failure modes of polymeric materials for HV outdoor insulation; Journal IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000,7 (3) 408-415.

[14] El-Kishky, H.; Gorur, R.S.; Electric field computation on an insulating surface with discrete water droplets; Journal: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.3, no.3, p.450-6, 1996.

[15] Rux, L.M.; Grzybowski, S.; Detecting delaminated stator winding insulation using the ramped high-voltage DC test method; Conference Title: Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering (Conf. Publ. No.467) Part vol.5 p.331-4 vol.5; 1999.

[16] Grzybowski, S.; Abu-Al-Feilat, E.A.; Knight, P.; Doriott, L.; Comparison of aging behavior of two-layer polymeric dielectrics aged at AC and DC voltages; Conference Title: 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.98CH36257), Part vol. 2 p.678-81; vol. 2, 1998.

[17] Awad, M. M., Elgengy, O., Arafa, B. A. The effect of industrial environmental conditions on the performance of conventional and polymeric insulator. High voltage engineering symposium, 22-27 August 1999. Conference Publication n 467 IEE, 1999

[18] -De La O A; Gorur R S; Burnham J T; Electrical performance of non-ceramic insulators in artificial contamination tests contamination tests: Role of resting time; Journal: IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 1996, 3 (6) 827-835.

[19] Wang Shaowu; Liang Xidong; Wang Liming; Guan Zhicheng; Kim Cholryong; Huang Lengceng; Shen Qinghe; Yong Jun; Wang Jingqin; Cheng Xueqi; Influence of shed profile on the outdoor insulation performance of polymeric insulators; Conference Title: Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.00CH36347)Part vol.2 p.785-9, vol.2, 2000.

[20] Tu, Yanming; Approaches to aging of composite insulators; Conference Title: 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials; Source: Proceedings of the IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials v 1 2000, IEEE, p 371-374.

-
- [21] Fernando, M.A.R. Manjula; Performance of non-ceramic insulators in tropical environments; Source: Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Högskola n 1544, p1-140, 1999.
- [22] Sorqvist, T.; Karlsson, U.; Vlastos, A.E.; Surface ageing and its impact on the performance of polymeric insulators; Conference Title: Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, Part vol.3, p.3234/1-4, vol.3, 1995.
- [23] Gorur, R.S.; Cherney, E.A.; Hackam, R.; Electrical performance of polymeric insulators in salt-fog; Journal: International Journal of Energy Systems vol.10, no.3 p.136-9; 1990.
- [24] Vosloo, W.L.; Holtzhausen, J.P.; Roediger, A.H.A.; Leakage current performance of naturally aged non-ceramic insulators under a severe marine environment; Conference Title: AFRICON '96. Incorporating AP-MTT-96 and COMSIG-96; 1996 IEEE AFRICON. 4th AFRICON Conference in Africa. Electrical Energy Technology, Communication Systems, Human Resources (Cat. No.96CH35866) Part vol.1, p.489-95 vol.1, 1996.
- [25] Van Wyk, L.; Holtzhausen, J.P.; Vosloo, W.L.; Surface conductivity as an indication of the surface condition of non-ceramic insulators; Conference Title: AFRICON '96. Incorporating AP-MTT-96 and COMSIG-96. 1996 IEEE AFRICON. 4th AFRICON Conference in Africa. Electrical Energy, Technology, Communication Systems, Human Resources (Cat.No.96CH35866), Part vol.1, p.485-8, vol.1, 1996
- [26] Basappa, Prathap; Lakdawala, Vishnu; Gerdin, Glenn; Computation of the electric field around a wet polluted insulator by analytic and finite-difference techniques; Conference Title: 2000 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; (CEIDP), Annual Report v2, 2000, p 478-481.
- [27] Karady, G.G.; Flashover mechanism of non-ceramic insulators; Journal: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, no.5 p.718-23, 1999.
- [28] VLASTOS, A.E. Transmission line polymeric insulators leak currents and performance, Gigre Proceedings of the 34th session. p. 15-401/ 1-8, v.1, 1994
- [29] Gorur, R. S.; de la O, A.; Shead, W. D.; Evaluation of naturally aged non-ceramic insulators; Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom.; 1996; Vol. 1, 386-389.
- [30] Sorqvist, T.; Gubanski, S.M.; Leakage current and flashover of field-aged polymeric insulators; Journal: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.6, no.5, p.744-53, 1999
- [31] De La O A; Gorur R S; Flashover of contaminated nonceramic outdoor insulators in a wet; Journal: IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 1998, 5 (6) 814-823

[32] Blackmore, P.; Birtwhistle, D.; Surface discharges on polymeric insulator shed surfaces; Journal: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation; vol.4, no.2, p.210-17;1997.

[33] Sorqvist, T.; Vlastos, A.E.; Hydrophobicity loss and leakage currents of long-term AC - and DC - energized polymeric insulators; Conference Title: Nordic Insulation Symposium. NORD-IS 96, p.249-56, 1996.

[34] Sorqvist, T.; Vlastos, A.E.; Hydrophobicity and leakage current statistics of polymeric insulators long-term exposed, to coastal contamination; Conference Title: Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.96CH35972), Part vol.1 p.335-40 vol.1; 1996.

[35] Vlastos, A.E.; Peak leak currents of silicone and EPDM transmission line polymeric insulator families; Conference Title: Seventh International Symposium on High Voltage Engineering p.279-82 vol.2, 1991.

[36] Vlastos, A. E.; Basic leak currents of generic silicone and EPDM transmission line polymeric insulators; Conference Title: Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No.91CH2937-1)p.977-80 vol.2, 1991.

[37] Bhana, D.K.; Swift, D. A.; An investigation into the temporary loss of hydrophobicity of some polymeric insulators and coatings; Part vol.1 p.294-7, vol.1; 1994.

[38] Das-Gupta, D.K.; Electrical properties of surfaces of polymeric insulators Journal: IEEE Transactions on Electrical Insulation vol.27, no.5 p.909-23, 1992.

[39] Norma ASTM G154 Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials;1998

[40] Norma NBR 6936 Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta Tensão ; ABNT; 1992.